REPUBLIQUE TUNISIENNE

Ministère de l'Agriculture,
des Ressources Hydrauliques et de la Pêche Maritime
Bureau de la Planification et des Equilibres Hydrauliques

ELABORATION DE LA VISION ET DE LA STRATEGIE DU SECTEUR DE L'EAU A L'HORIZON 2050 POUR LA TUNISIE

« EAU 2050 »

Etape 3 :
Réalisation des Etudes Prospectives Multithématiques et Etablissement de Modèles Prévisionnels Offre-Demande (Bilans)

Volume 2 : Modèles Prévisionnels Offre-Demande (Bilans)

Version Provisoire

STUDI INTERNATIONAL

Décembre 2020

VOLUME II

Modèle prévisionnel Offre-Demande

(Bilan hydrique)

SOMMAIRE

1 CHAPITRE I : DESCRIPTION DU MODELE EAU 2050 DEVELOPPE 11

1.1 DE LA GESTION DE L'OFFRE A LA GESTION DE LA DEMANDE 11

1.1.1 Introduction 11

1.1.2 Apports généraux d'une Modélisation Hydro-économique 11

1.1.3 . Apports à l'étude Eau 2050 12

1.1.4 Résultats attendus 14

1.2 CONCEPTUALISATION DU MODELE « EAU 2050 » 15

1.2.1 Approche de modélisation retenue 15

1.2.2 Logiciel utilisé 16

1.2.3 Moyens mis en œuvre et nature des activités menées 17

1.2.4 Echelle spatiale et temporelle de modélisation 18

1.3 ARCHITECTURE DU MODELE : OBJETS ET LIAISONS 19

1.3.1 Gestion des eaux de surface 21

1.3.2 Gestion des eaux souterraines 25

Gestion et valorisation par bassin versant/aquifère de l'irrigation 26

1.3.3 Alimentation en eau potable : Milieu urbain et rural 28

1.3.4 Assainissement 31

1.3.5 Autres sources non conventionnelles 34

1.3.6 Prévision de la demande en eau 35

1.4 CONSTRUCTION DU MODELE : DONNEES IMPLEMENTEES 37

1.4.1 Eaux de surface 37

1.4.2 Eaux souterraines 41

1.4.3 Gestion et valorisation par bassin versant de l'irrigation 42

1.4.4 Alimentation en eau potable : Milieu urbain et rural 45

1.4.5 Assainissement urbain et rural 45

1.4.6 Réutilisation des eaux traitées 46

1.5 CALAGE ET VALIDATION DU MODELE 47

1.5.1 Calage du modèle 47

1.5.2 Validation du modèle 54

2 CHAPITRE 2 : SIMULATIONS DU MODELE PAR THEME DES TDRS 60

2.1 LES EAUX DE SURFACE 60

2.1.1 Modélisation dynamique du système eaux de surface 60

2.1.2 Forçages 60

2.1.3 Sorties modèle des bilans des barrages 80

2.2 LES NAPPES SOUTERRAINES 82

2.2.1 Méthode de simulation 82

2.2.2 Résultats de la simulation 93

2.3 GESTION ET VALORISATION PAR BASSIN VERSANT/AQUIFERE DE L'IRRIGATION 94

2.3.1 Méthode de simulation 94

2.3.2 Résultats des simulations 99

2.4 L'ALIMENTATION EN EAU POTABLE URBAINE ET RURALE 99
2.4.1 Liminaire 99
2.4.2 Méthode de simulation 100
2.4.3 Résultats des simulations 100
2.4.4 Benchmarking 116
2.5 L'ASSAINISSEMENT 119
2.5.1 L'assainissement urbain 119
2.5.2 L'assainissement rural 127
2.5.3 La réutilisation des eaux traitées 128
2.5.4 Benchmarking 132
3 CHAPITRE 3 : LES SCENARIOS ET LEURS OUTPUT 135
3.1 MODELES PREVISIONNELS OFFRE/DEMANDE 2050 PAR REGION 135
3.2 NEXUS EAU, AGRICULTURE, ENERGIE 143
3.2.1 Situation énergétique en Tunisie 143
3.2.2 Les énergies renouvelables 144
3.2.3 Eau & Energie 146
3.2.4 Impact de changement climatique sur les ressources en eau 149
3.2.5 Stratégie CES comme un forçage de résilience aux changements climatiques 150
3.2.6 Les pressions 152
4 CHAPITRE 4 : CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS : VERS UN MODELE RAISONNE D'AIDE A LA DECISION DE LA GESTION DE LA DEMANDE 157

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Articulation Système Eau (quatre composantes) : Contribution de la modélisation hydro-économique 11

Figure 2 : Schéma d'élaboration du modèle hydro-économique 14

Figure 3 : Démarche suivie 15

Figure 4 : Concertation pour la validation des données 17

Figure 5 : Illustration du modèle selon le découpage en 6 régions 18

Figure 6 : Boite de dialogue de paramétrage de l'échelle temporelle du modèle WEAP 18

Figure 7 : Architectures des modèles Eau2050_Agri (a) et Eau2050_Allocation (b) 20

Figure 8 : Architecture des rivières dans le modèle WEAP 21

Figure 9 : Interface WEAP des données de la variable « Débit de tête » 21

Figure 10 : Architecture des réservoirs dans le modèle WEAP 22

Figure 11 : Interface WEAP des données de la catégorie « physique » des objets « Réservoir ». 22

Figure 12 : Interface WEAP de mise à jour des données de la catégorie « Opération » des objets « Retenues » 22

Figure 13 : Différentes zones d'une retenue dans WEAP (SEI, 2017) 23

Figure 14: Interface WEAP des données de la catégorie « Energie hydroélectrique » des objets « Retenues » 23

Figure 15 : Interface WEAP des données des variables de la qualité de l'eau des objets « Retenues » 23

Figure 16 : Interface WEAP des variables coûts des objets « Retenues » 23

Figure 17 : Interface WEAP de la variable « Priorité de distribution » des objets « Retenues » 24

Figure 18 : Situation journalières des barrages (source ONAGRI) 24

Figure 19 : Capacité dynamique à la cote Retenue normale du barrage Nebhana depuis sa mise en eau 25

Figure 20: Architecture des nappes souterraines dans le modèle WEAP 25

Figure 21 : Interface WEAP de mise à jour des données de la catégorie « Physique » des objets « Eau souterraine » 26

Figure 22 : Interface WEAP de mise à jour des données de la catégorie « Occupation du sol » 26

Figure 23 : Interface WEAP de mise à jour des données de la catégorie « Climat » 26

Figure 24 : Interface WEAP des données de la catégorie « Irrigation » 27

Figure 25 : Interface WEAP des données de la catégorie « Rendement » 27

Figure 26 : Interface WEAP des données de la catégorie « Coût » 27

Figure 27 : Interface WEAP de choix de la méthode de calcul de la demande pour un « Bassin versant » 28

Figure 28 : Architecture des sites de demandes dans le modèle WEAP 28

Figure 29 : Interface WEAP de mise à jour des données d'un site de demande. 28

Figure 30 : Interface WEAP des données des taux de pertes des systèmes d'AEP (Exemple) 29

Figure 31 : Interface WEAP des données des variables de la qualité de l'eau des sites de demandes 29

Figure 32 : Interface WEAP des variables coûts des sites de demandes 30

Figure 33 : Interface WEAP de la variable « Priorité de distribution » des sites de demandes 30

Figure 34 : Interface WEAP de choix de la méthode de calcul des demandes 30

Figure 35 : Architecture des STEP dans le modèle WEAP 31

Figure 36 : Interface WEAP de mise à jour des données de la catégorie « Traitement » des objets « Station d'épuration » 31

Figure 37: exemple de connexion entre un site de demande et l'objet STEP tels qu'implémenté dans le modèle 32

Figure 38 : Interface WEAP de mise à jour des données du paramètre « Consommation » des objets « Station d'épuration » 32

Figure 39 : Interface WEAP de mise à jour des données du paramètre « MO depollution » des objets « Station d'épuration » 33

Figure 40 : Interface WEAP de mise à jour des données du paramètre « MO Concentration » des objets « Station d'épuration » 33

Figure 41 : Interface WEAP de mise à jour des données du paramètre « salinité dépollution » des objets « Station d'épuration » 34

Figure 42 : Interface WEAP de mise à jour des données du paramètre « salinité concentration » des objets « Station d'épuration » 34

Figure 43 : Interface WEAP de mise à jour des données de la catégorie « Débit entrant et sortant » des objets « Autre source ». 34

Figure 44 : Interface WEAP de mise à jour des données de la catégorie « Réutilisation » pour le site de traitement Ariana 35

Figure 45 : Interface WEAP de la catégorie « Règles de liaison » des objets « Liaison de transmission » 35

Figure 46 : Interface WEAP de mise à jour des données de la catégorie « Pertes » des objets « Liaison de transmission » 35

Figure 47 : Interface WEAP de mise à jour des données de la catégorie « Débits entrant et sortant » des objets « Déviation ». 36

Figure 48 : Interface WEAP de mise à jour des données de la catégorie « Débits entrant et sortant » des objets « Débits de retour » 36

Figure 49 : Interface WEAP de mise à jour des données de la catégorie « Qualité de l'eau » des objets « Débits de retour » 36

Figure 50 : La série temporelle adoptée en amont de Medjerda 37

Figure 51 : Courbe Hauteur/Volume du barrage Nebhana 38

Figure 52 : Evaporation mensuelle (2002-2015) au barrage Bouheurtma 38

Figure 53 : Différentes zones d'une retenue dans WEAP (SEI, 2017) 38

Figure 54 : Transfert d'eau entre les barrages Sidi Barrak et Sedjnene 39

Figure 55 : Volumes mensuels transférés du barrage Sidi barrak à Sedjnene 39

Figure 56 : Transfert d'eau du barrage Sidi Salem au barrage Aroussia 40

Figure 57 : Axes de transfert d'eau des barrages Beni Mtir et Kasseb 40

Figure 58 : Axes de transfert d'eau pour le centre Est 41

Figure 59 : Exemple d'interaction entre les ressources en eaux et les centres de demandes à Medenine 42

Figure 60 : Surface Agricole annuelle des PPI (2002-2015) 43

Figure 61 : Surface Agricole annuelle des PPI (2002-2015) 43

Figure 62 : Surface Agricole annuelle des PIP (2002-2015) 44

Figure 63 : Surface Agricole annuelle des PIP (2002-2015) 44

Figure 64 : Pourcentages de contributions des sources d'eaux dans la desserte d'un site de demande dans le modèle d'allocation. Cas du site « Tataouin_Urbain_SONEDE » 45

Figure 65 : *Liaisons de transmissions d'un site de traitement dans le modèle. Cas du site « WT_EL_KEF»* 46

Figure 66 : *Liaisons de transmissions d'un site de demande (Périmètre irriguée) avec un site de traitement dans le modèle. Cas du site « Ariana_PPI »* 47

Figure 67 : Règles de gestion du barrage Sidi Salem (2002-2015) 48

Figure 68 : Exemple de calage du barrage Bouheurtma 49

Figure 69 : Exemple de calage du barrage Sidi Salem 50

Figure 70 : Exemple de calage du barrage Sedjnene 51

Figure 71 : Exemple de calage du barrage Nebhana 52

Figure 72: Corrélations des volumes simulés et observés après le calage des barrage 53

Figure 73 : Ressources en eaux de surface mobilisées observés et simulés (2002-2015) 54

Figure 74 : Bilan mensuel du barrage Sidi Salem 2002-2015 54

Figure 75 : Capacité de résilience par l'interconnexion des barrages et la gestion globale des eaux de surface 55

Figure 76 : Corrélation entre demande en eau annuelle observée et simulée (2002-2015) 55

Figure 77 : Besoin en eau Potable (2002-2015) 56

Figure 78 : Besoin EP en 2015 56

Figure 79 : Statistiques des demandes annuelles en eau potable par région (2002-2015) 57

Figure 80 : Besoins en eaux des PPI 58

Figure 81 : Besoins en eaux des PIP 59

Figure 82 : Scénarios d'évolution du climat (Representative Concentration Pathways RCP) 61

Figure 83 : Forçages radiatifs, anomalies des températures moyennes annuelles et projections 2030 et 2100 des quatre scénarios RCP. 61

Figure 84 : Projection des anomalies des précipitations pour les quatre scénarios RCP à l'horizon 2100 62

Figure 85 : tendance et projection des Températures et précipitations 62

Figure 86 : Domaine de l'Euro-CORDEX 63

Figure 87 : Anomalie de température (A gauche) et Indice de précipitation (A droite) à l'horizon 2015 64

Figure 88 : Projection des anomalies de précipitation à l'horizon 2050 65

Figure 89 : Projection des anomalies de précipitation à l'horizon 2100 65

Figure 90 : tendances des températures moyennes, minimales et maximales annuelles entre 1950 et 2010 65

Figure 91 : Projection des anomalies des températures à l'horizon 2050 (INM) 66

Figure 92 : Projection des anomalies des températures à l'horizon 2100 (INM) 66

Figure 93 : Montage des forçages climatiques sur le modèle 68

Figure 94 : Remontée des étages bioclimatiques entre 1971 et 2040 68

Figure 95 : Analyse quantilique comparative de l'hydrologie du centre et du sud de la Tunisie 70

Figure 96 : rythme d'envasement moyen à Nebhana (1965-2050) 71

Figure **97**: Catégories des barrages selon leurs durées de vie 77

Figure 98 : Pertes Économiques des Pays de MENA en rapport avec la qualité de l'eau potable et de l'assainissement (2016) 78

Figure 99 : Ajustement de la salinité des eaux de Nabhana en fonction des apports 79

Figure 100 : Salinité des eaux du barrage Nebhana telle qu'implémentée dans le modèle jusqu'à 2050 79

Figure 101 : Bilan annuel du barrage Bouhertma 80

Figure 102 : Bilan annuel du barrage Sidi Salem 80

Figure 103 : Bilan annuel du barrage Sedjnene 81

Figure 104 : Bilan annuel du barrage Nabhana 81

Figure 105 : Illustration de la nappe de GROMBALIA 84

Figure 106 : Illustration de la nappe de ZAGHOUAN_OUED ELRMEL 85

Figure 107 : Illustration de la nappe de BOUHAFNA 87

Figure 108 : Illustration de la nappe de NEFZAOUA 89

Figure 109 : Illustration de la nappe de HAOUARIA 90

Figure 110 : Illustration de la nappe de SMINJA 91

Figure 111 : Illustration de la nappe de CT MAATOUG 92

Figure 112 : Variation du stock dans le système aquifère Bou Hafna- Serdja-Ech chouachi 93

Figure 113 : Variation du stock dans le système aquifère Plaine de Kairouan 93

Figure 114 : Variation du stock dans le système aquifère Nabeul 94

Figure 115 : Schéma conceptuel de modélisation des besoins en eau agricoles par Gouvernorat. 94

Figure 116 : Architecture des nœuds "Bassin versant" représentant les PPI du Gouvernorat du Kef. 95

Figure 117 : Série chronologique de la précipitation de l'étage bioclimatique Sub-Humide de 2001 à 2015 95

Figure 118 : Modulation du coefficient cultural des cultures et des durées des cycles physiologiques utilisés pour la modélisation des besoins en eau agricoles (Source : Aide de WEAP) 97

Figure 119 : Bibliothèque des cultures utilisée pour la modélisation des besoins en eau agricoles 97

Figure 120 : Demandes en eau d'irrigation des nœuds PPI et PIP des 24 Gouvernorats de la Tunisie, de 2002 à 2015. 98

Figure 121 : Structure du fichier « *.csv » des demandes en eau mensuelles exportées du modèle Eau2050_Agri au modèle Eau2050_Allocation 98

Figure 122 : Données de croissance démographiques 101

Figure 123 : Indice des ressources en eau per capita 101

Figure 124: Projection de la population à l'Ariana jusqu'à 2050 tel qu'inséré dans le modèle STUDI Eau 2050 102

Figure 125: Benchmarking de la consommation spécifique 116

Figure 126 : Consommation spécifique dynamique du réseau EP tel qu'implémenté dans le modèle jusqu'à 2050 117

Figure 127 : Rendement dynamique du réseau EP tel qu'implémenté dans le modèle jusqu'à 2050 118

Figure 128 : Projection tendancielle de la capacité de traitement des eaux usées à Tunis jusqu'à 2050 126

Figure 129 : Rejet des eaux usées traitées par rapport au milieu récepteur 127

Figure 130 : Modélisation des rejets des STEP dans les milieux récepteurs dans le modèle 127

Figure 131 : Implémentation des demandes écologiques dans le modèle 132

Figure 132 : Ratio d'eau usée réutilisée /Ratio d'eau traitée 132

Figure 133 : Bilan 2050 région NORD-OUEST 136

Figure 134 : Bilan 2050 région NORD-EST 137

Figure 135 : Bilan 2050 région CENTRE-OUEST 138

Figure 136 : Bilan 2050 région CENTRE-EST 139

Figure 137 : Bilan 2050 région SUD-OUEST 140

Figure 138 : Bilan 2050 région SUD-EST 141

Figure 139 : Projection du bilan hydrique pour les périodes intermédiaires 142

Figure **140** : Répartition de la production d'électricité 143

Figure **141** : Répartition des sources d'énérgie 143

Figure 142 : Baisse des coûts des modules PV entre 2008-2020 145

Figure 143 : Baisse des prix des modules pv 2008-2020 145

Figure 144 : Différentes chaînes de production d'hydrogène "vert 148

Figure 145 : Evolution des ressources en eau de surface et souterraine selon scénarios RCP 4.5 et 8.5 150

Figure 146 : Tendance d'extension des surfaces irriguées à l'échelle nationale 153

Figure 146 : Tendance d'extension des surfaces irriguées par région 153

Figure 148 : Tendance d'extension des surfaces irriguées par région 155

Figure 149 : Corrélation et tendance entre les surfaces irriguées et les prélèvements des nappes souterraines dans le Centre Ouest 156

Figure 149 : Pollution et évolution du cycle « hydro-social » 157

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Eléments de la base des données 17
Tableau 2 : Répartition de la surface agricole des PPI par région pour 2005,2010 et 2015 43
Tableau 3 : Répartition de la surface agricole des PPI par région pour 2005,2010 et 2015 44
Tableau 4: Besoin en eau Potable par région pour les années 2005, 2010 et 2015 56
Tableau 5 : Les besoins en eau des PPI en 2005, 2010 et 2015 en Mm3 58
Tableau 6 : Les besoins en eau des PIP en 2005, 2010 et 2015 en m3 59
Tableau 7 : Synthèse des évolutions des variables climatiques 66
Tableau 8 : Autres indicateurs climatiques clés 67
Tableau 9 : Déficits pluviométriques et hydrologiques pour quelques années sèches en Tunisie 69
Tableau 10 : Statistiques quantiliques des écarts à normale en pourcentage 70
Tableau 11 : Mesures de l'envasement des barrages 72
Tableau 12 : Rythme d'envasement du barrage Mellègue 74
Tableau 13 : Probabilités de longévité des barrages 75
Tableau 14 : Labélisation des nappes 82
Tableau 15 : Estimation des besoins en eaux des PPI et PIP à l'horizon 2050 99
Tableau 16 : Projections de la population 2020-2050 par hypothèse 103
Tableau 17 : Projections de la population par gouvernorat 2020-2050 : Hypothèse Moyenne 103
Tableau 18 : Projections de la population Rurale-SONEDE 105
Tableau 19 : Projections de la population Rurale-GR 106
Tableau 20 : Projections de la population Urbaine 107
Tableau 21 : Hypothèses de projections des consommations spécifiques domestiques et des rendements du réseau 108
Tableau 22 : Projections des consommations spécifiques urbaines par gouvernorat (l/j/hab) 109
Tableau 23 : Projections des consommations spécifiques rurales-SONEDE par gouvernorat (l/j/hab) 109
Tableau 24 : Projections de la consommation spécifique rurale-GR par gouvernorat (l/j/hab.) 110
Tableau 25 : volumes d'eau produits et distribués en 2018 111
Tableau 26 : Indicateurs d'évolution des rendements de distribution de l'eau potable 111
Tableau 27 : Hypothèses de projections des rendements du réseau 112
Tableau 28 : Projections des rendements des réseaux par gouvernorat (%) 112
Tableau 29 : Projections de la consommation industrielle (10^3m3) 114
Tableau 30 : Projections de la consommation touristique (10^3 m3) 115
Tableau 31 : Benchmarking du rendement du réseau 117
Tableau 32 : Essai de proposition de grille ajustée sur le coût de revient 118
Tableau 33: Benchmarking de la tarification de l'eau potable 119
Tableau 34 : Projection des taux de raccordement au réseau public d'assainissement dans le milieu urbain par gouvernorat (%) 120
Tableau 35 : Projections des volumes des eaux usées collectées (M^3/an) 121
Tableau 36 : Projection des taux d'épuration (%) 122
Tableau 37 : Projection des volumes des eaux traitées (Mm^3/an) 123
Tableau 38 : Projection de la capacité de traitement par gouvernorat (Mm^3/an) 124

Tableau 39 : Répartition des STEP et du volume traité en fonction du niveau de traitement 126
Tableau 40 : Projection des volumes des eaux traitées (Mm3/an) dans le monde rural (ONAS) 128
Tableau 41 : Types de réutilisation : exigences de mise en œuvre et de gestion) 133
Tableau 42 : Bilan hydrique global à l'horizon 2050 142
Tableau 43 : Projection du bilan hydrique pour les périodes intermédiaires 142
Tableau 44 : Production d'électricité à partir des énergies renouvelables 144
Tableau 45 : Evolution des ressources renouvelables en Tunisie 145
Tableau 46 : Evolution du pompage PV en Tunisie 146
Tableau 47 : Caractéristiques des différentes technologies de stockage 147
Tableau 48 : Synthèse étude Département de l'Énergie 148
Tableau 49 : Apports d'eau calculés selon les différentes formules d'estimation des écoulements 149
Tableau 50 : Réalisations des stratégies de CES de 1990 à 2011 151

1 CHAPITRE I : DESCRIPTION DU MODELE EAU 2050 DEVELOPPE

1.1 DE LA GESTION DE L'OFFRE A LA GESTION DE LA DEMANDE

1.1.1 Introduction

A titre exceptionnel, hors TDR et offre technico-financière, dans le but de maximiser la pertinence et la vraisemblance des résultats de l'étude Eau 2050, le Bureau d'Etudes a élaboré et conduit une modélisation hydro-économique du « système Eau » en parallèle à la confection des scénarios. Ce modèle, entièrement innovant, est basé sur les relations de dépendance et d'influence entre les différentes variables et tous les éléments de comptabilité de l'eau ainsi que toutes autres relations de cause à effet au sein du système.

Le modèle permet de vérifier et de consolider la cohérence des scénarios, de quantifier les aspects exprimés uniquement en termes qualitatifs et d'établir des prévisions. Le modèle peut également inspirer de nouvelles pistes pour les scénarios.

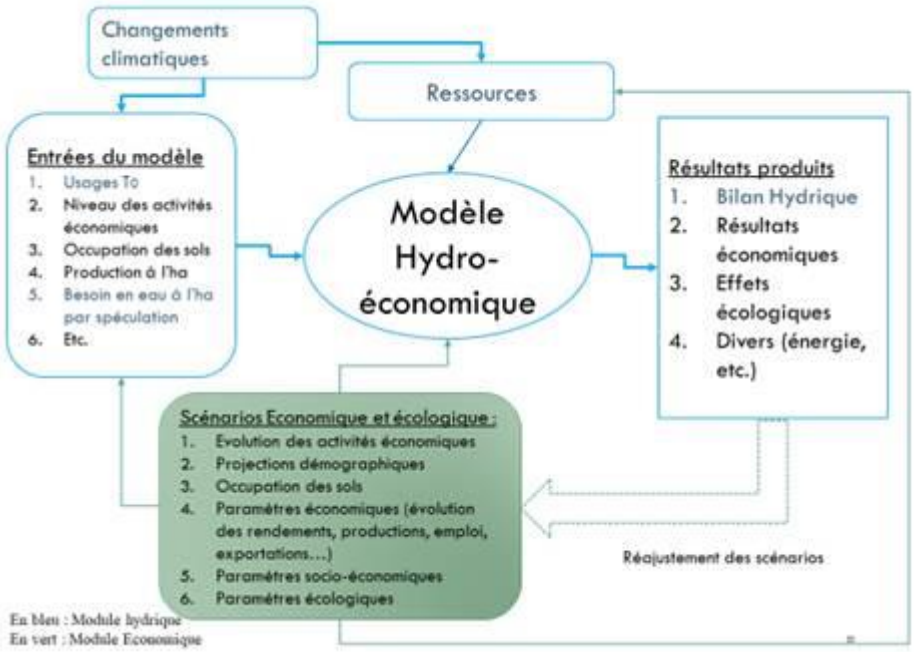


Figure 1 : Articulation Système Eau (quatre composantes) : Contribution de la modélisation hydro-économique

Source : STUDI Eau 2050

La modélisation hydro-économique proposée vise en particulier à apprécier la faisabilité hydrique des choix socio-économiques à réaliser dans le cadre des divers scénarii envisagés. Le calcul d'un bilan hydrique mettant en rapport les besoins en eau des choix économiques retenus et des demandes d'eau potable d'une part et des ressources disponibles est un indicateur de nature à renseigner cette faisabilité. Ce bilan est à établir aussi bien au niveau des 24 gouvernorats qu'à l'échelle nationale.

1.1.2 Apports généraux d'une Modélisation Hydro-économique

Les études économiques et hydrologiques sont souvent conduites en parallèle sans aucune intégration. Les nombreuses interactions entre processus biophysiques et sociétaux ne sont donc pas prises en

compte, ce qui peut conduire à élaborer des programmes de mesures sous-optimaux en termes de coûts ou d'efficacité. Les modèles hydro-économiques (MHE) permettent de dépasser ce cloisonnement disciplinaire.

La modélisation hydro-économique permet une vision globale sur le fonctionnement des systèmes hydrologique et hydrogéologique et leurs interactions avec les processus biophysiques (demandes en eaux agricoles, urbaines, industrielles, touristiques et environnementales, productions agricoles, pollutions, consommation d'énergie, etc.) et d'évaluer les performances socio-économiques, sous différents scénarios.

Les objectifs spécifiques recherchés sont en général les suivants

- Quantifier les ressources en eaux de surface sous les effets de conditions climatiques ;
- Quantifier les ressources en eau souterraines ;
- Estimer les demandes en eau agricole, domestique, industrielle, touristique et environnementale ;
- Simuler le fonctionnement des infrastructures hydrauliques utilisées pour le transfert de l'eau ainsi que les liaisons hydrauliques entre les ressources et les demandes ;
- Modéliser la gestion des barrages retenus dans l'étude ;
- Estimer les productions agricoles ;
- Estimer les consommations d'énergie par la mobilisation, le transfert et l'usage de l'eau ;
- Evaluer les coûts de mobilisation, de transfert et d'usage de l'eau ;
- Simuler la dynamique de la qualité de l'eau (salinité, nitrates, etc…) dans le système hydraulique ;
- Caractériser le système de prise en charge des eaux usées, leurs traitements et quantifier les rejets dans les milieux récepteurs ;
- Evaluer les valeurs économiques des productions agricoles

1.1.3 Apports à l'étude Eau 2050

La modélisation hydro-économique en cours d'élaboration dans le cadre de l'étude Eau 2050 est d'un grand apport pour la structuration et l'illustration quantitative des scénarios.

En particulier :

Archiver et organiser les données du système eau en Tunisie, selon une distribution spatiale et temporelle. Ces données, de différentes natures, origines et échelles sont harmonisées, spatialisées et mises en relations à travers des modèles thématiques qui échangent leurs entrées et sorties ;

Disposer d'une représentation holistique des systèmes hydro-bio-physiques, avec des liaisons dynamiques entre les demandes et les ressources, capable de simuler l'utilisation des ressources, les taux de satisfactions des demandes, les coûts, les pollutions et les performances socio-économiques ;

Implémenter, simuler et évaluer les performances des scénarios climatiques, de gestion et de planification alternatifs.

In fine, cette approche de modélisation holistique constituera un « Outil d'Aide à la Décision » pour le choix de la meilleure option de développement future.

- Le modèle proposé d'étude hydro-économique sera développé comme un outil d'aide à la décision dont les paramètres d'entrée et les leviers de commande sont comme suit :
- Les statistiques climatiques et hydrologiques des années sèches, normales et humides ;
- Les ressources en eau mobilisées et mobilisables en fonction des changements climatiques ;
- Les facteurs de dégradation : salinisation, remontée du toit de vase des barrages, pollution ;
- Les scénarios de croissance démographique à l'horizon 2050 ;
- Les coûts technologiques et énergétiques de mobilisation et de transfert de l'eau ;

- L'empreinte eau des différentes consommations sectorielles : agricoles, industrielles, etc. ;
- Le modèle de développement socio-économique du pays (qui n'existe pas mais qu'il faudra esquisser compte-tenu des facteurs internes et externes qui l'influencent (PIB, énergie, denrées alimentaires de base, libre échange, etc.) ;
- Les demandes en eau sectorielles en fonction de différents scénarios (rationné, sobre, efficient, tendanciel, non maitrisé, etc.) ;
- L'eau virtuelle à l'import et à l'export et son impact en matière de PIB et de l'équilibre de la balance commerciale ;

Le modèle est développé et interfacé de façon à permettre la multiplication des scénarios croisés et l'aide à la décision au service des décideurs pour maintenir les équilibres entre l'offre et la demande. Il permet au décideur une meilleure affectation de la ressource en eau en minimisant les pertes et les gaspillages avec une meilleure valorisation de l'eau.

Il s'agit d'un modèle stochastique-dynamique qui permet la simulation des équilibres hydrauliques à l'horizon : 2025, 2030, 2040 et 2050.

Les principaux éléments de forçage impactant l'offre et la demande sont climatiques, anthropiques, socio-économiques, énergétiques, etc.

Le modèle hydro-économique conçoit des bilans « offre-demande » régionalisés, permettant d'adapter la gestion de l'eau aux évolutions induites par le changement climatique, d'une part, et le développement des usages de l'eau, d'autre part. Il permet d'explorer les arbitrages entre les investissements et les avantages urbains, agricoles, environnementaux, etc.

Conceptuellement, le modèle intègre les modules suivants :

- ➔ La combinaison de la quantification des eaux de surface et des eaux souterraines qui fournit les éléments indispensables pour une gestion optimale de la ressource en eau au bénéfice de tous les usagers. Les deux approches Eaux de surface/Eaux souterraines développées sont couplées et interfacées de façon à obtenir des simulations intégrées (gestion de crues, recharge de la nappe et interaction eaux de surface-eaux souterraines) ;
- ➔ Un module agro-climatique établi pour calculer le besoin en eau d'irrigation par étage bioclimatique et pour 19 cultures ; il simule les besoins en eau futurs, séquentiellement à l'horizon 2050, associés à différents scénarios de changement climatique et d'évolution économique ;
- ➔ Un module régionalisé de projections démographiques et de prévision des besoins en eau potable, permettant d'établir la demande en eau future des zones urbaines et rurales, à l'horizon 2050, et en tenant compte des ODD à l'horizon 2030 ;
- ➔ Une analyse technico économique qui permettra d'identifier des mesures d'économie d'eau (modernisation des périmètres irrigués et des réseaux d'eau potable, changement de comportement des usagers), le cas échéant de mobilisation de nouvelles ressources (eau profonde, dessalement des eaux saumâtres, EUT). Le coût de la mise en œuvre de ces mesures et les volumes d'eau associés seront estimés dans chaque contexte spécifique (Etape 4).

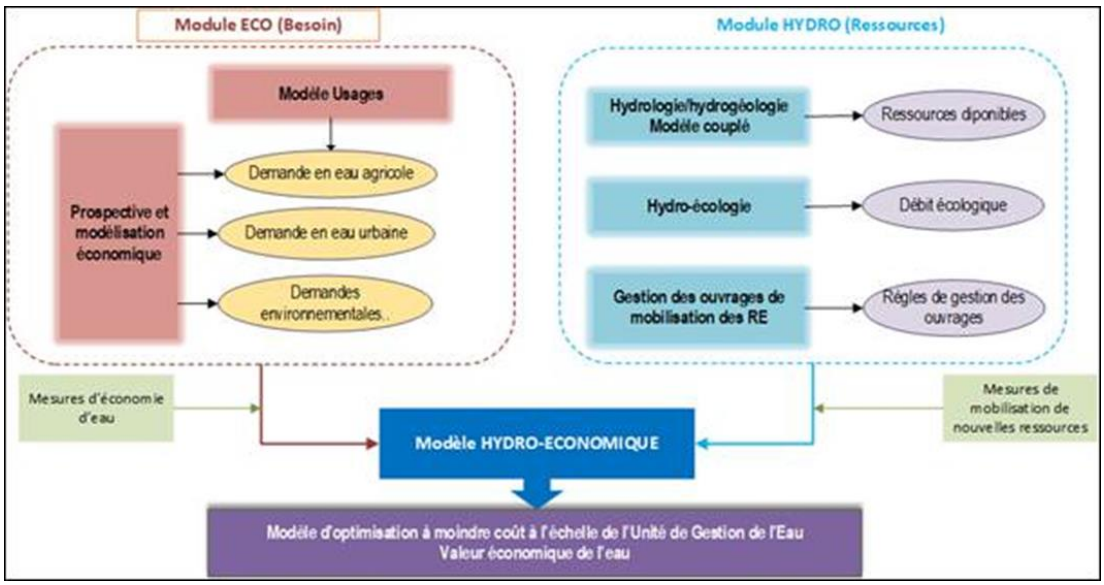


Figure 2 : Schéma d'élaboration du modèle hydro-économique

Source : STUDI Eau 2050

Le SIG est utilisé en particulier pour l'analyse holistique des données et pour la réalisation/actualisation des cartes thématiques relatives aux ouvrages de mobilisation, aux Périmètres irrigués, aux superficies agricoles disponibles, à l'estimation et la planification séquentielle du potentiel irrigable dans les Grands bassins à partir des géodatabases.

Les traitements SIG ont notamment permis l'implémentation du modèle en couches numérisées et spatialisées des inputs tels que : précipitations, températures, écoulements, évapotranspirations, qualité des eaux, etc.

1.1.4 Résultats attendus

Le modèle hydro-économique, calé sur la période 2002 – 2015, s'appuie sur une ingénierie analytique prédictive aboutissant à :

- Une estimation des besoins en eau mensuels théoriques des principales cultures pratiquées en Tunisie par une méthode universelle (FAO 56), sur la base des paramètres climatiques de chaque étage et par Gouvernorat, de 2010 à 2050 ;
- Une projection des besoins mensuels en eau (urbains et ruraux), touristiques et industriels, de 2010 à 2050 ;
- Une caractérisation du fonctionnement des barrages (apports, prélèvements, pertes, déversements) et les comportements des aquifères (recharge et exploitation) ;
- Une estimation des productions agricoles et des productivités des cultures principales pratiquées en Tunisie ;
- Une estimation *in fine* des coûts de mobilisation, de transfert et de distribution d'eau ;
- La mise en évidence de l'impact des eaux usées évacuées sur les systèmes tant en termes de fonctionnement des stations de traitement (Impact environnemental) que de ressources additionnelles à valoriser ;
- Une évaluation des pollutions dues aux déversements des eaux usées brutes et traitées aux systèmes récepteurs ;
- Une projection des critères qualitatifs (salinité et nitrates) des aquifères.

Globalement, le modèle doit simuler les équilibres hydrauliques dans l'espace et dans le temps en intégrant tous ces éléments de complexité du système.

1.2 CONCEPTUALISATION DU MODELE « EAU 2050 »

1.2.1 Approche de modélisation retenue

Pour représenter le système eau en Tunisie, il est choisi d'entreprendre une approche de modélisation globale considérant à la fois le découpage administratif (six régions), hydrologique (bassin versant) et climatique (étages bioclimatiques) permettant une agrégation flexible des résultats.

L'approche de modélisation retenue intègre les aspects hydrologiques, hydrogéologiques, agricoles, urbains, industriels, touristiques et environnementaux du système eau. Les données de base validées lors de la phase de diagnostic s'intègrent dans un modèle qui reproduit, le plus fidèlement possible, son fonctionnement. Les modèles thématiques sont mis en relations dynamiques pour échanger les résultats de leurs calculs.

En plus, et pour représenter les préférences des utilisateurs de l'eau ainsi que les gestionnaires, sont aussi considérés les priorités des satisfactions des demandes (eau potable, agricole, industrie, tourisme, environnement), les préférences d'approvisionnement (eau de surface, eau souterraine, EUT) et les règles de gestion des ressources en eau des barrages. Le modèle construit est alors calé sur la base de données collectées lors de la phase de diagnostic, pour la période 2002 - 2015.

Les projections et les simulations s'étendent de 2020 à 2050. Cette étape a nécessité l'identification des tendances futures en matière de climat, population, consommation spécifique, surfaces agricoles, qualité, rejets d'eau usée, etc. Ainsi, le modèle permet de quantifier, par ces données, le bilan de l'eau selon un scénario de référence.

La figure suivante présente la démarche suivie pour la confection du modèle hydro-économique :

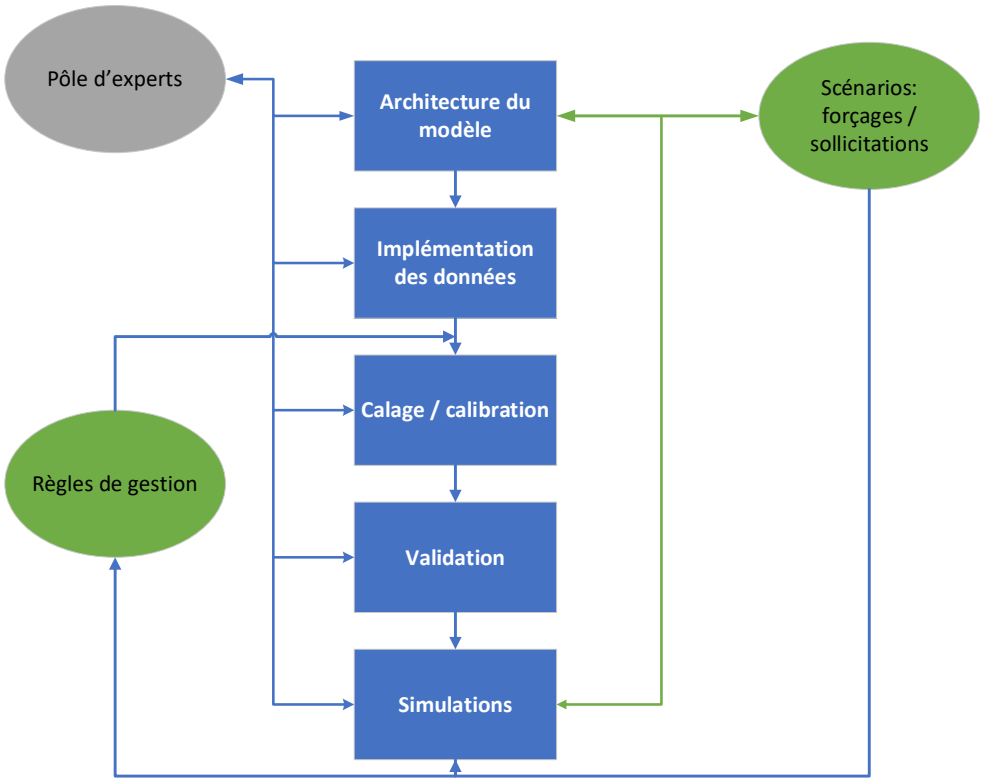


Figure 3 : Démarche suivie

Source : STUDI Eau 2050

1.2.2 Logiciel utilisé

Le choix du modèle s'est porté sur le logiciel WEAP compte tenu de :

Sa flexibilité dans le traitement et l'analyse des données des ressources et des usages ;

Sa capacité d'interfaçage avec d'autres logiciels de traitement et d'implémentation des inputs (SGBD et SIG) ;

Mais surtout sa capacité d'intégrer la complexité spatiale et temporelle à l'échelle d'un territoire et en l'occurrence de l'ensemble de la Tunisie.

Le logiciel « **Water Evaluation and Planning** » (WEAP), développé par 'Stockholm Environnement Institute' (SEI), est un logiciel de modélisation hydrologique et pour la gestion intégrée et durable des ressources en eau. L'intégration se fait sur plusieurs dimensions : entre la demande et l'offre, entre la quantité et la qualité de l'eau et entre les objectifs de développement économique et les contraintes environnementales.

WEAP permet la création de « comptes courants » du système eau étudié. Sur la base de diverses tendances économiques, démographiques, hydrologiques et technologiques, une projection d'un scénario tendanciel dit «**de référence** » est établie. A partir de ce scénario, il est possible de simuler l'impact sur le bilan hydrique d'un ou plusieurs scénarios prospectifs, incluant des hypothèses alternatives sur les développements futurs.

WEAP représente un outil efficace pour l'évaluation des options alternatives du développement et de la gestion de l'eau. WEAP calcule un bilan massique de l'eau et de la pollution pour chaque nœud et lien du système modélisé. L'eau est acheminée pour répondre aux besoins environnementaux, de la consommation et de l'hydroélectricité, sous réserve des priorités de la demande, des préférences d'approvisionnement, du bilan de masse et d'autres contraintes. Les charges ponctuelles de pollution dans les plans d'eau récepteurs et les concentrations de qualité des eaux sont calculées.

WEAP offre le choix parmi cinq méthodes pour simuler les processus aux bassins versants tels que l'évapotranspiration, le ruissellement, l'infiltration et les demandes d'irrigation. Ces méthodes comprennent (1) Modèles pluie-Débit ; (2) l'approche par coefficient simplifié de la FAO ; (3) la méthode de l'humidité du sol ; (4) la méthode FAO 56 et (5) la méthode de croissance des plantes.

Pour chaque pas de temps, le flux des calculs suit l'ordre suivant

- Demande annuelle et exigences d'approvisionnement pour chaque site de demande et exigence de débit, évapotranspiration potentielle du bassin versant, accumulation de neige, ruissellement et infiltration, en supposant qu'il n'y ait pas (encore) d'irrigation ;
- Entrées et sorties d'eau pour chaque nœud et lien du système. Cela comprend le calcul des retraits des sources d'approvisionnement pour répondre à la demande et l'envoi de réservoirs. Cette étape est résolue par un programme linéaire (LP), qui tente d'optimiser la satisfaction des sites de demande (avec le même pourcentage) et des besoins en débits, sous réserve des priorités des demandes, des préférences de l'offre, du bilan massique et d'autres contraintes ;
- Production hydroélectrique ;
- Coûts et avantages en capital et de l'exploitation ;
- Production de pollution par les sites de demande, flux et traitement des polluants, charges sur les milieux récepteurs, concentrations dans les rivières.

:

1.2.3 Moyens mis en œuvre et nature des activités menées

La base de données collectées et validées lors de la phase de diagnostic a été utilisée pour alimenter le modèle :

Tableau 1 : Eléments de la base des données

Donnée	Source
Bilans des barrages consolidés et validés	DGBGTH : Phase 1 du diagnostic
Données climatiques mensuelles représentatifs des différents étages bioclimatiques	INM, DGRE : Phase 1 du diagnostic
Surfaces des périmètres irriguées entre 2002 et 2018	MARHPM
Débits mensuels (2002-2018) arrivants aux réservoirs	DGBGTH, DGRE : Phase 1 du diagnostic
Courbes HVS des barrages	DGBGTH
Caractéristiques physiques des barrages (Capacité, cote PHE, tranche morte, etc.)	DGBGTH, ONAGRI : Phase 1 du diagnostic
Volumes mensuels transférés	DGBGTH, DGRE, SECADENORD, SONEDE
Capacité de système de transfert	SECADENORD, SONEDE
Capacité de traitement des STEP	ONAS : Phase 1 du diagnostic
Capacité de dessalement des SDEM	SONEDE : Phase 1 du diagnostic
Capacité de dessalement SDES	SONEDE : Phase 1 du diagnostic
Données quantitatives et qualitatives des nappes	DGRE
Occupation des sols	SIG développé : Phase 1 du diagnostic
Architecture du système hydraulique	SIG développé : Phase 1 du diagnostic

Source : STUDI Eau 2050

Ces différentes données ont été collectées, traitées et validées suivant une approche participative en sollicitant l'avis des différents intervenants.

Figure 4 : Concertation pour la validation des données

Source : STUDI Eau 2050

1.2.4 Echelle spatiale et temporelle de modélisation

Le modèle hydro-économique est développé à l'échelle de la Tunisie. Ce modèle permet d'agréger les résultats pour les six régions spécifiées par les TDRs de l'étude : Nord Est, Nord-Ouest, Centre Est, Centre Ouest, Sud Est et Sud-ouest.

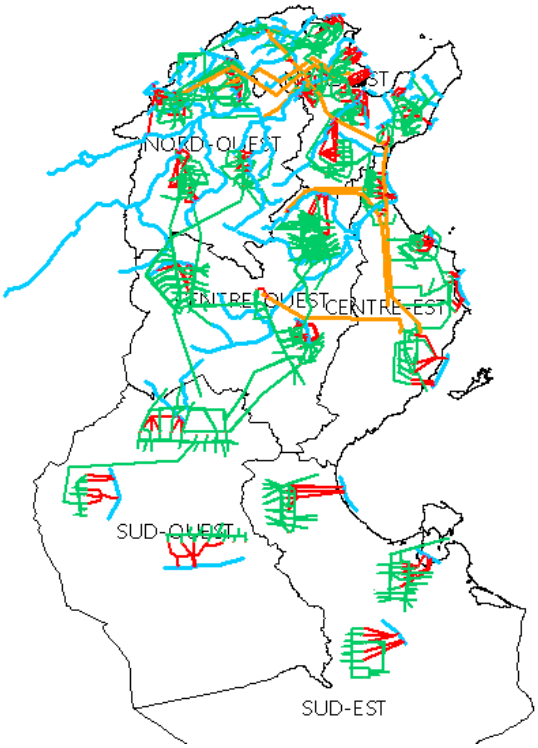


Figure 5 : Illustration du modèle selon le découpage en 6 régions

Source : STUDI Eau 2050

L'échelle temporelle du modèle s'étend de 2002 à 2050. La période 2002-2015 est choisie comme période de référence à la fois récente et relativement représentative. La période 2020 – 2050 constitue la période de simulation des scénarios alternatifs, selon un pas de temps mensuel. L'année de modélisation coïncide avec l'année hydrologique qui débute en septembre. La Figure 6 présente la boite de dialogue de paramétrage de l'échelle temporelle du modèle.

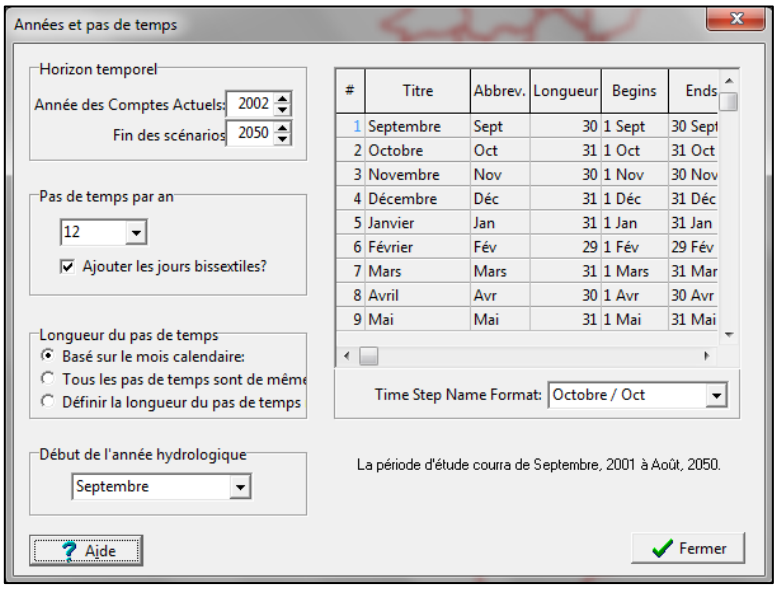


Figure 6 : Boite de dialogue de paramétrage de l'échelle temporelle du modèle WEAP

Source : STUDI Eau 2050

1.3 ARCHITECTURE DU MODELE : OBJETS ET LIAISONS

Le modèle est construit sur la base d'un schéma conceptuel représentant les centres des demandes, les sources d'eau et les infrastructures hydrauliques. La taille du modèle élaboré a pris de l'importance du fait de la prise en compte de :

Une longue période de simulation (2002 – 2050) avec un pas de temps mensuel : 588 pas de temps ;

Différencier entre la demande des PPI et des PIP : 48 sites de demandes agricoles ;

Cinq (05) étages bioclimatiques par site de demande agricole PPI et PIP : SH, H, SA, A, S ;

Dix-neuf (19) cultures par sites de demande agricole (PPI et PIP) et par étage bioclimatique : 4560 branches de culture à modéliser, par pas de temps ;

168 sites de demandes représentant les demandes en eau potable (urbain SONEDE, rural SONEDE, rural GR), industrielle et touristique ;

Cent soixante-cinq (165) nœuds « ***Eau souterraine*** » pour représenter toutes les nappes ;

Soixante-trois (63) « ***Rivière*** » représentant les principaux cours d'eau ;

Onze (11) « ***Déviation*** » représentant les principaux axes de transfert existants d'eau entre bassins versants ;

Cent soixante-seize (176) « ***Débit de retour*** » pour représenter les systèmes d'assainissement retournant les eaux usées aux stations d'épuration ;

Quarante-huit (48) « ***Retenue*** » représentant les barrages principaux (existants et planifiés) ;

Vingt-quatre (24) grappes « ***Station d'épuration*** » à raison d'une grappe par gouvernorat ;

« ***Autre source*** » représentant les stations de dessalement d'eau utilisées et programmées ;

Huit cent quatre-vingt-cinq (885) « ***Liaison de transmission*** » représentant les connections hydrauliques entre les sources et les sites de demandes et les transferts entre les sources.Compte tenu de la taille de l'architecture du modèle, il a été choisi de scinder l'effort de modélisation en deux étapes, pour assurer des temps d'exécutions acceptables :

Modélisation des besoins en eau et de la production agricoles des PPI et des PIP, : Modèle « Eau2050_Agri » ;

Modélisation de la mobilisation et de la gestion des ressources (allocation et transfert) : Modèle « Eau2050_Allocation ».

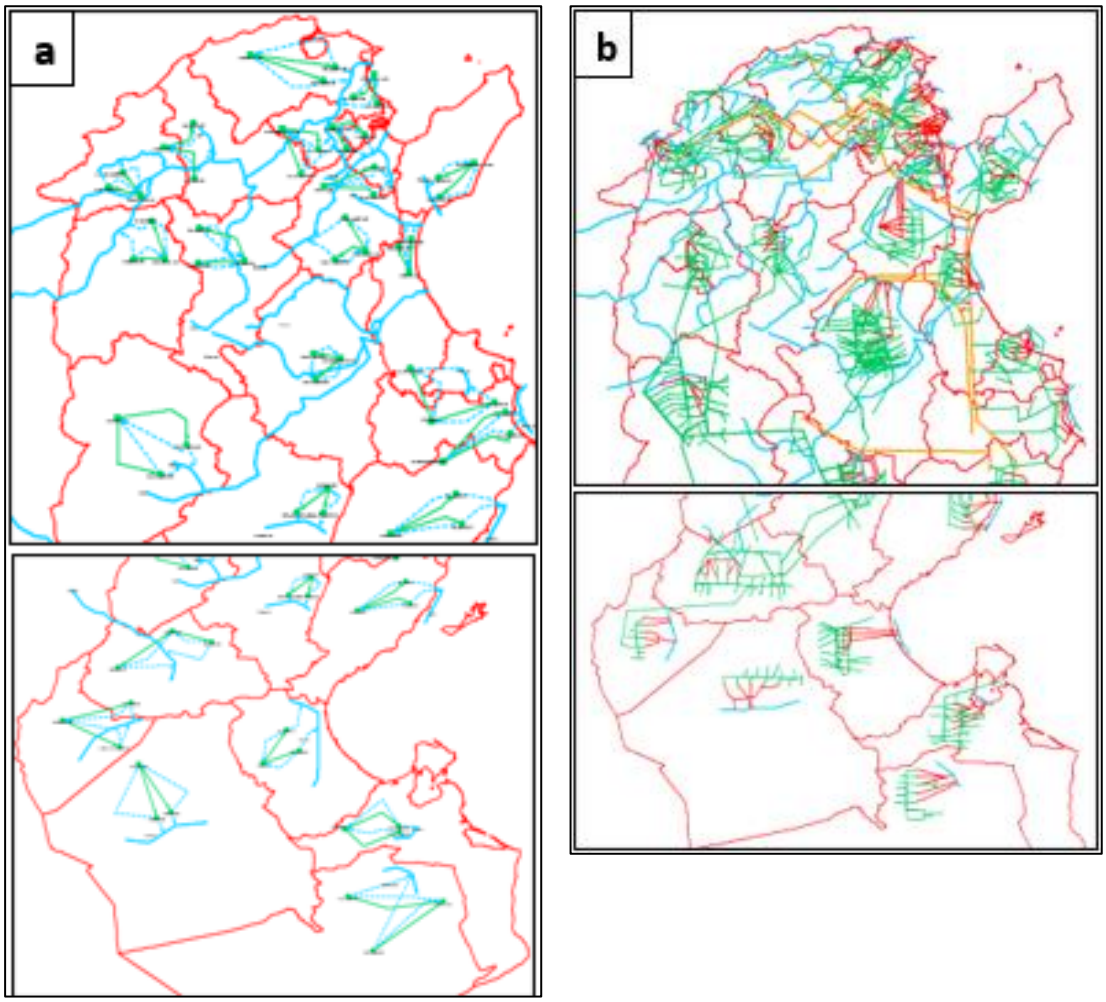


Figure 7 : Architectures des modèles Eau2050_Agri (a) et Eau2050_Allocation (b)

Source : STUDI Eau 2050

Le modèle est composé d'objets WEAP représentant des sources d'eau, des sites de demandes et des liaisons hydrauliques de transfert entre les régions. Ce paragraphe décrit les composantes du modèle et liste les données implémentées.

1.3.1 Gestion des eaux de surface

Rivières (Oueds)

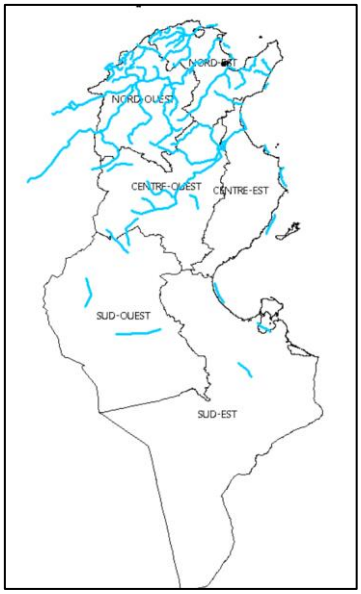


Figure 8 : Architecture des rivières dans le modèle WEAP

Source : STUDI Eau 2050

Les objets « ***Rivières*** » sont caractérisés dans le modèle par leurs variables « ***Débit de tête*** » et les paramètres de la qualité de l'eau (Figure).

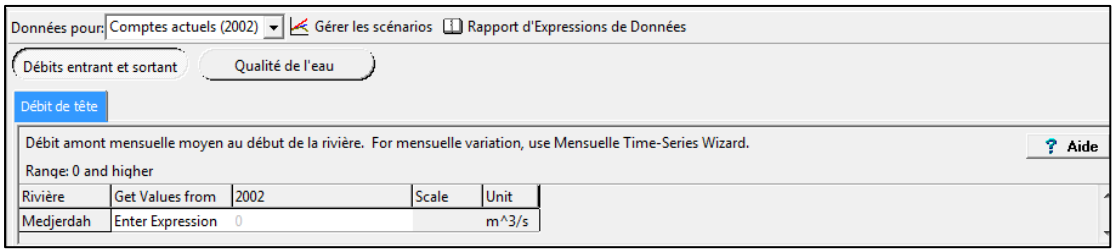


Figure 9 : Interface WEAP des données de la variable « Débit de tête »

Source : STUDI Eau 2050

Réservoirs

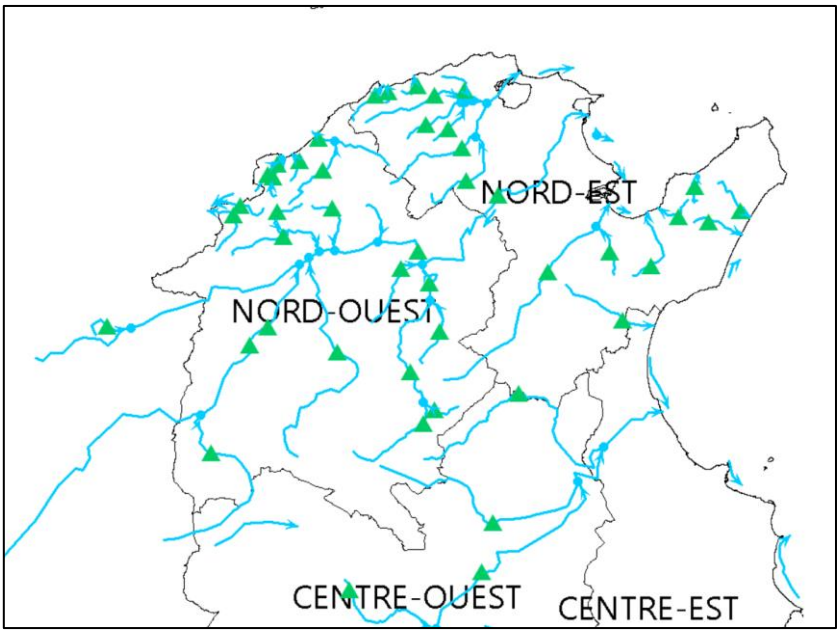


Figure 10 : Architecture des réservoirs dans le modèle WEAP

Source : STUDI Eau 2050

Les objets « ***Réservoir*** » sont caractérisés par les onglets suivants :

« Physique » : Regroupe les variables[1] « ***Storage capacity*** », « ***Initial storage*** », « ***Volume elevation curve*** », « ***Net evaporation*** », « ***Maximum Hydraulic Outflow*** », « ***Loss to groundwater*** » et « ***Observed Volume*** » (Figure 11).

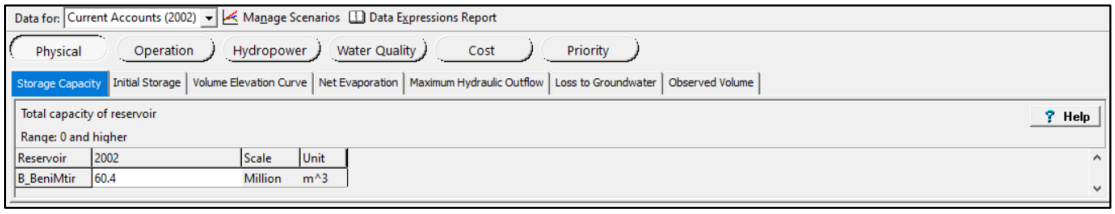


Figure 11 : Interface WEAP des données de la catégorie « physique » des objets « Réservoir ».

Source : STUDI Eau 2050

« Opération »: Regroupe les variables[2] « ***top of conservation*** », « ***top of buffer*** », « ***top of Inactif*** » et « ***Buffer Coefficient*** » (Figure 12)

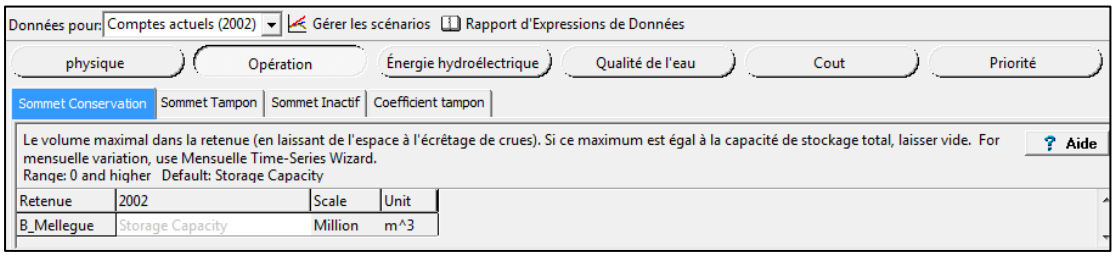


Figure 12 : Interface WEAP de mise à jour des données de la catégorie « Opération » des objets « Retenues »

Source : STUDI Eau 2050

[1] Capacité de stockage, Stockage initial, courbe Volume Altitude, Evaporation nette, Perte vers la nappe, Volume observé.
[2] Sommet conservation, Sommet tampon, Sommet Inactif, Coefficient tampon.

Ces variables permettent de découper la retenue d'un barrage en trois fractions : Conservation, tampon et inactive (Figure ci-dessous).

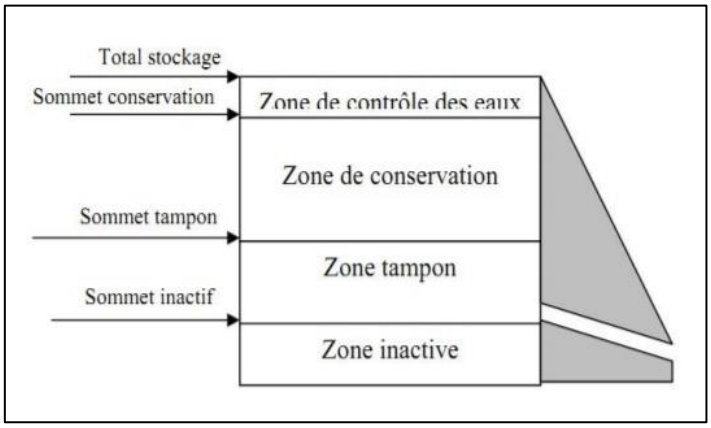


Figure 13 : Différentes zones d'une retenue dans WEAP (SEI, 2017)

Source : STUDI Eau 2050

« Energie hydroélectrique » : Cette catégorie regroupe les variables nécessaires pour simuler la production de l'énergie hydroélectrique dans les barrages (Figure 14) :

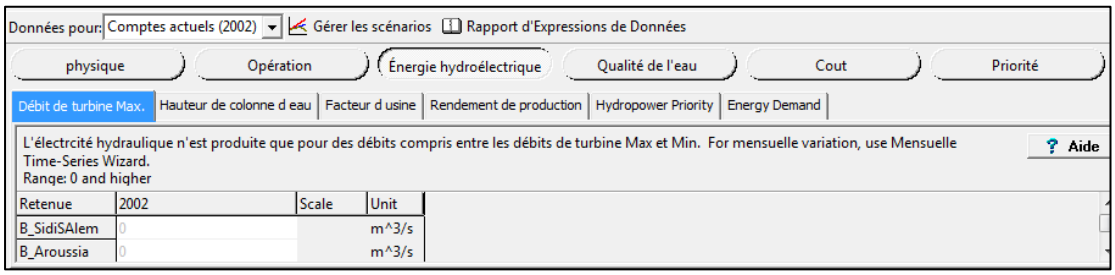


Figure 14: Interface WEAP des données de la catégorie « Energie hydroélectrique » des objets « Retenues »

Source : STUDI Eau 2050

« Qualité de l'eau » : Regroupe les variables relatives à la qualité de l'eau (Figure 15) :

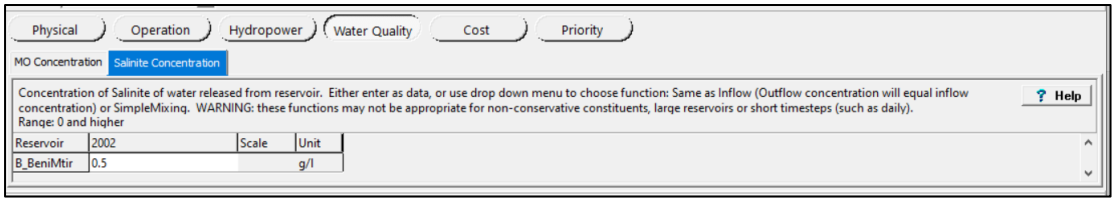


Figure 15 : Interface WEAP des données des variables de la qualité de l'eau des objets « Retenues »

Source : STUDI Eau 2050

« Coût » : Regroupe les variables relatives à l'utilisation de l'eau à l'intérieur du site de demande : « ***Coût du capital*** », ***« Coût variables O et M »***, ***« Coût fixes O et M »***, « ***Revenu variable*** » et « ***Revenu fixe*** » (Figure16) :

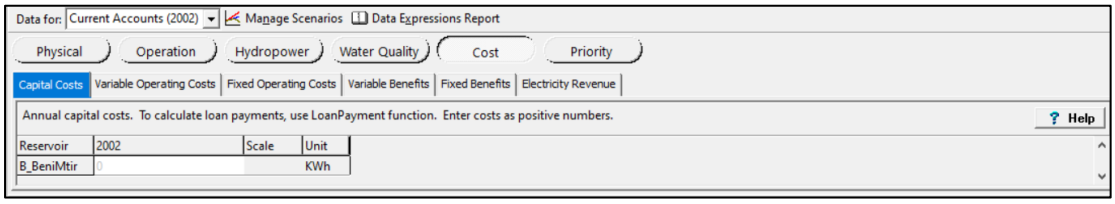


Figure 16 : Interface WEAP des variables coûts des objets « Retenues »

Source : STUDI Eau 2050

« Priorité » : Renferme la variable « ***Priorité de distribution*** », qui représente la priorité de satisfaction du site de demande. La priorité « 1 » signifie que le site est le plus prioritaire (Figure 17).

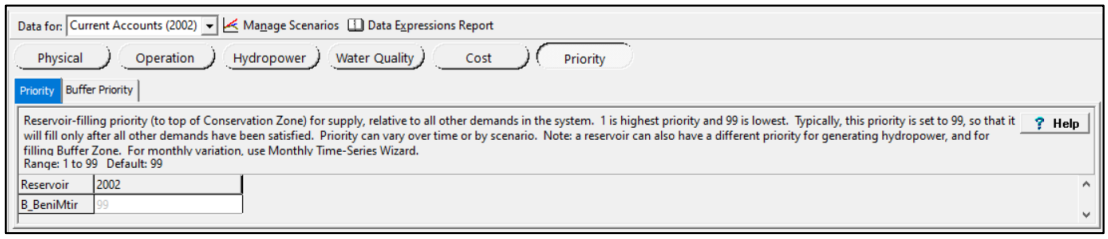
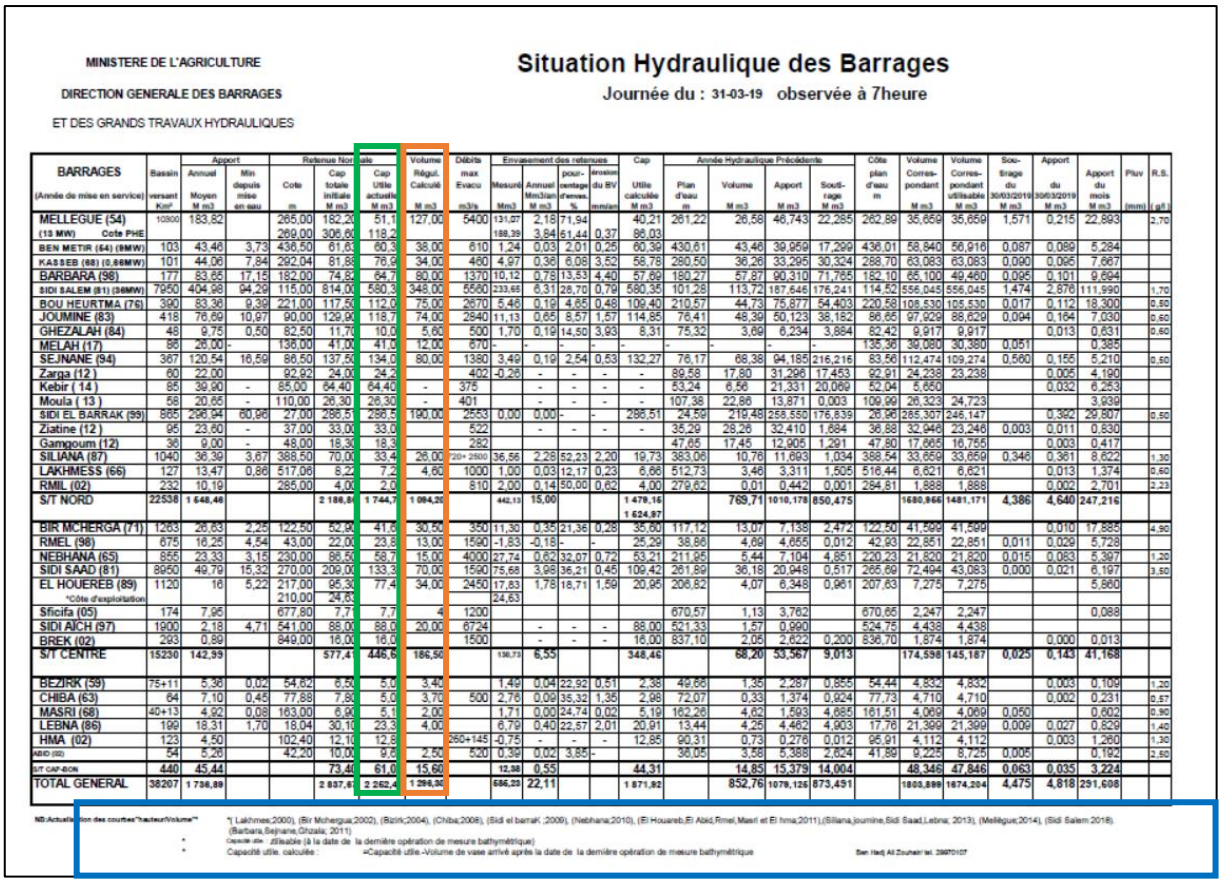


Figure 17 : Interface WEAP de la variable « Priorité de distribution » des objets « Retenues »

Source : STUDI Eau 2050

Implémentation dynamique de l'envasement des barrages : Cas du barrage Nebhana

Un taux d'envasement moyen est adopté pour le calage des bilans hydrauliques des différents réservoirs (2002-2015). Pour chaque barrage, les données Cotes-Volumes-Surfaces ont été fournies par la DGBGTH. Ces données nous renseignent sur les capacités actuelles des barrages. Les situations journalières des barrages publiées par l'ONAGRI[3] (figure ci-après) indiquent les capacités initiales des réservoirs (encadré en vert) et les capacités actuelles (encadrés en orange). Les années des dernières bathymétries sont indiquées dans le même document (encadré en bleu).



MINISTERE DE L'AGRICULTURE

DIRECTION GENERALE DES BARRAGES

ET DES GRANDS TRAVAUX HYDRAULIQUES

Situation Hydraulique des Barrages

Journée du : 31-03-19 observée à 7heure

BARRAGES (Année de mise en service)	Bassin versant Km²	Apport Annuel Moyen M m3	Apport Min depuis mise en eau	Retenue Normale Cote m	Retenue Normale Cap totale initiale M m3	Retenue Normale Cap Utile actuelle M m3	Volume Régul. Calculé M m3	Débits max Evacu m3/s	Envasement des retenues Mesuré Mm3	Envasement des retenues Annuel Mm3/an	Envasement des retenues pourcentage d'envas. %	Envasement des retenues érosion du BV mm/an	Cap Utile calculée M m3	Année Hydraulique Précédente Plan d'eau m	Année Hydraulique Précédente Volume M m3	Année Hydraulique Précédente Apport M m3	Année Hydraulique Précédente Soutirage M m3	Côte plan d'eau m	Volume Correspondant M m3	Volume Correspondant utilisable M m3	Soutirage du 30/03/2019 M m3	Apport du 30/03/2019 M m3	Apport du mois M m3	Pluv (mm)	R.S. (l/s)
MELLEGUE (54)	10900	183,82		265,00	182,20	51,1	127,00	5400	131,07	2,18	71,94		40,21	261,22	26,58	46,743	22,285	262,89	35,659	35,659	1,571	0,215	22,893		2,70
(13 MW) Cote PHE				269,00	306,60	118,2			188,39	3,84	61,44	0,37	86,03												
BEN METIR (64) (9MW)	103	43,46	3,73	436,50	61,63	60,3	38,00	610	1,24	0,03	2,01	0,25	60,39	430,61	43,46	39,959	17,299	436,01	58,840	56,916	0,087	0,089	5,284		
KASSEB (88) (0,66MW)	101	44,06	7,84	292,04	81,88	76,9	34,00	460	4,97	0,36	6,08	3,52	58,78	280,50	36,26	33,295	30,324	288,70	63,083	63,083	0,090	0,095	7,667		
BARBARA (98)	177	83,65	17,15	182,00	74,82	64,7	80,00	1370	10,12	0,78	13,53	4,40	57,89	180,27	57,87	90,310	71,765	182,10	65,100	49,460	0,095	0,101	9,694		
SIDI SALEM (81) (36MW)	7950	404,98	94,29	115,00	814,00	580,3	348,00	5560	233,65	6,31	28,70	0,79	580,35	101,28	113,72	187,646	176,241	114,52	556,045	556,045	1,474	2,876	111,990		1,70
BOU HEURTMA (76)	390	83,36	9,39	221,00	117,50	112,0	75,00	2670	5,46	0,19	4,85	0,48	109,40	210,57	44,73	75,877	54,403	220,58	105,530	105,530	0,017	0,112	18,300		0,50
JOUMINE (83)	418	76,69	10,97	90,00	129,90	118,7	74,00	2840	11,13	0,65	8,57	1,57	114,85	76,41	48,39	50,123	38,182	86,65	97,929	88,629	0,094	0,164	7,030		0,60
GHEZALAH (84)	48	9,75	0,50	82,50	11,70	10,0	5,60	500	1,70	0,19	14,50	3,93	8,31	75,32	3,69	6,234	3,884	82,42	9,917	9,917		0,013	0,631		0,60
MELAH (17)	86	26,00	-	136,00	41,00	41,0	12,00	670	-	-	-	-	-	-	-	-	-	135,36	39,080	30,380	0,051		0,385		
SEJNANE (94)	367	120,54	16,59	86,50	137,50	134,0	80,00	1380	3,49	0,19	2,54	0,53	132,27	76,17	68,38	94,185	216,216	83,56	112,474	109,274	0,560	0,155	5,210		0,50
Zarga (12)	60	22,00		92,92	24,00	24,2		402	-0,26	-	-	-	-	89,58	17,80	31,296	17,453	92,91	24,238	23,238		0,005	4,190		
Kebir (14)	85	39,90	-	85,00	64,40	64,40	-	375		-	-	-	-	53,24	6,56	21,331	20,069	52,04	5,650			0,032	6,253		
Moula (13)	58	20,65	-	110,00	26,30	26,30	-	401		-	-	-	-	107,38	22,86	13,871	0,003	109,99	26,323	24,723			3,939		
SIDI EL BARRAK (99)	865	296,94	60,96	27,00	286,51	286,5	190,00	2553	0,00	0,00	-	-	286,51	24,59	219,48	258,555	176,839	26,96	285,307	245,147		0,362	29,807		0,50
Ziatine (12)	95	23,60	-	37,00	33,00	33,0		522		-	-	-	-	35,29	28,26	32,410	1,684	36,88	32,946	23,246	0,003	0,011	0,830		
Gamgoum (12)	36	9,00	-	48,00	18,30	18,3		282						47,65	17,45	12,905	1,291	47,80	17,665	16,755		0,003	0,417		
SILIANA (87)	1040	36,39	3,67	388,50	70,00	33,4	26,00	20+ 2500	36,56	2,28	52,23	2,20	19,73	383,06	10,76	11,693	1,034	388,54	33,659	33,659	0,346	0,361	8,622		1,30
LAKHMESS (66)	127	13,47	0,86	517,06	8,22	7,2	4,60	1000	1,00	0,03	12,17	0,23	6,66	512,73	3,46	3,311	1,505	516,44	6,621	6,621		0,013	1,374		0,60
RMIL (02)	232	10,19		285,00	4,00	2,0		810	2,00	0,14	50,00	0,62	4,00	279,62	0,01	0,442	0,001	284,81	1,888	1,888		0,002	2,701		0,23
S/T NORD	22538	1 648,46			2 188,8	1 744,7	1 094,25		442,13	15,00			1 479,16 1 624,87		769,71	1010,178	850,475		1680,966	1481,171	4,386	4,640	247,216		
BIR MCHERGA (71)	1263	26,83	2,25	122,50	52,90	41,6	30,50	350	11,30	0,35	21,36	0,28	35,60	117,12	13,07	7,138	2,472	122,50	41,599	41,599		0,010	17,885		4,90
RMEL (98)	675	16,25	4,54	43,00	22,00	23,8	13,00	1590	-1,83	-0,18	-	-	25,29	38,66	4,69	4,655	0,012	42,93	22,851	22,851	0,011	0,029	5,728		
NEBHANA (65)	855	23,33	3,15	230,00	88,50	58,7	15,00	4000	27,74	0,62	32,07	0,72	53,21	211,95	5,44	7,104	4,851	220,23	21,820	21,820	0,015	0,083	5,397		1,20
SIDI SAAD (81)	8950	49,79	15,32	270,00	209,00	133,3	70,00	1590	75,68	3,96	36,21	0,45	109,42	261,89	36,18	20,948	0,517	265,89	72,494	43,083	0,000	0,021	6,197		3,50
EL HOUEREB (89)	1120	16	5,22	217,00	95,30	77,4	34,00	2450	17,83	1,78	16,71	1,59	20,95	206,82	4,07	6,348	0,961	207,63	7,275	7,275			5,560		
*Côte d'exploitation				210,00	24,63				24,63																
Sficifa (05)	174	7,95		677,80	7,7	7,7	4	1200						670,57	1,13	3,762		670,65	2,247	2,247			0,088		
SIDI AICH (97)	1900	2,18	4,71	541,00	88,00	88,0	20,00	6724		-	-	-	88,00	521,33	1,57	0,990		524,75	4,438	4,438					
BREK (02)	293	0,89		849,00	16,00	16,0		1500		-	-	-	16,00	837,10	2,05	2,822	0,200	836,70	1,874	1,874		0,000	0,013		
S/T CENTRE	15230	142,99			577,4	446,6	186,50		130,73	6,55			348,46		68,20	53,567	9,013		174,598	145,187	0,025	0,143	41,168		
BEZIRK (59)	75+11	5,36	0,02	54,62	6,50	5,0	3,40		1,49	0,04	22,92	0,51	2,38	49,66	1,35	2,287	0,855	54,44	4,832	4,832		0,003	0,109		1,20
CHIBA (63)	64	7,10	0,45	77,88	7,80	5,0	3,70	500	2,76	0,09	35,32	1,35	2,98	72,07	0,33	1,374	0,924	77,73	4,710	4,710		0,002	0,231		0,57
MASRI (68)	40+13	4,92	0,08	163,00	6,90	5,1	2,00		1,71	0,00	24,74	0,02	5,19	162,26	4,62	1,593	4,685	161,51	4,069	4,069	0,050		0,602		0,90
LEBNA (86)	199	18,31	1,70	18,04	30,10	23,3	4,00		6,79	0,40	22,57	2,01	20,91	13,44	4,25	4,463	4,903	17,76	21,399	21,399	0,009	0,027	0,829		1,40
HMA (02)	123	4,50		102,40	12,10	12,8		260+145	-0,75	-	-	-	12,85	90,31	0,73	0,276	0,012	95,91	4,112	4,112		0,003	1,260		1,30
ABID (02)	54	5,26		42,20	10,00	9,6	2,50	520	0,39	0,02	3,85	-		36,05	3,58	5,388	2,624	41,89	9,225	8,725	0,005		0,192		2,50
S/T CAP-BON	440	45,44			73,40	61,0	15,60		12,38	0,55			44,31		14,85	15,379	14,004		48,346	47,846	0,063	0,035	3,224		
TOTAL GENERAL	38207	1 736,89			2 837,6	2 262,4	1 296,30		686,33	22,11			1 871,92		852,76	1079,126	873,451		1803,899	1674,204	4,475	4,818	291,608		

NB:Actualisation des courbes"hauteur/Volume"* *) Lakhmes(2000), (Bir Mchergua(2002), (Bizirk(2004), (Chiba(2008), (Sidi el barrak ,2009), (Nebhana(2010), (El Houareb,El Abid,Rmel,Masri et El hma(2011),(Sillana,Joumine,Sidi Saad,Lebna(2013), (Meliègue(2014), (Sidi Salem 2018), (Barbara,Sejnane,Ghzala(2011)

* Capacité utile : Utilisable (à la date de la dernière opération de mesure bathymétrique)

* Capacité utile. calculée : =Capacité utile.-Volume de vase arrivé après la date de la dernière opération de mesure bathymétrique

Figure 18 : Situation journalières des barrages (source ONAGRI)

Source : STUDI Eau 2050

[3] http://www.onagri.nat.tn/barrages

Exemple : Barrage Nebhana

La capacité initiale en 1965 est de 86.5 Mm^3 ;

La capacité en 2002[4] est de 62,1 Mm^3 ;

La capacité en 2010 (dernière campagne) est de 58,76 Mm^3 ;

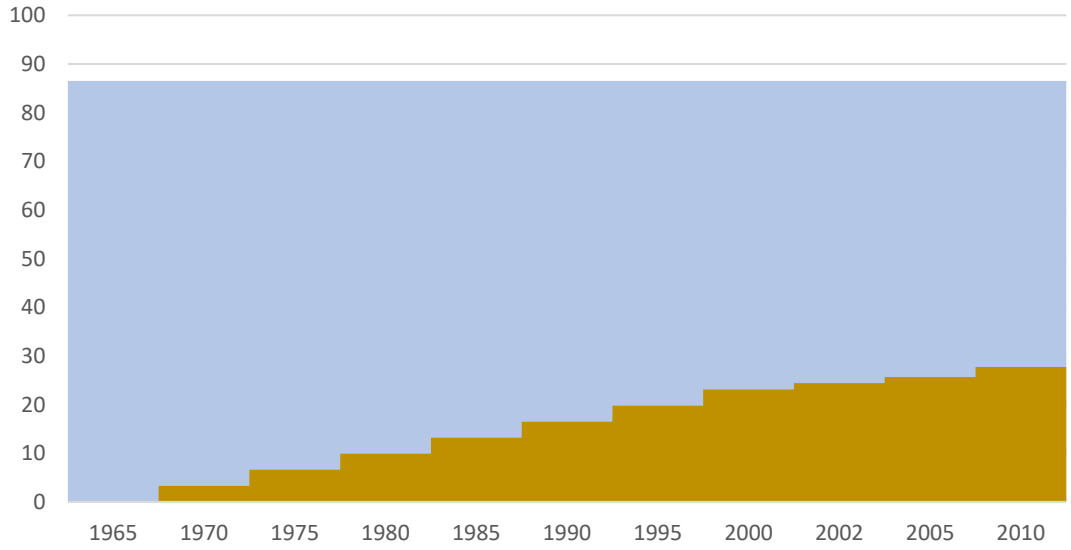


Figure 19 : Capacité dynamique à la cote Retenue normale du barrage Nebhana depuis sa mise en eau

Source : STUDI Eau 2050

1.3.2 Gestion des eaux souterraines

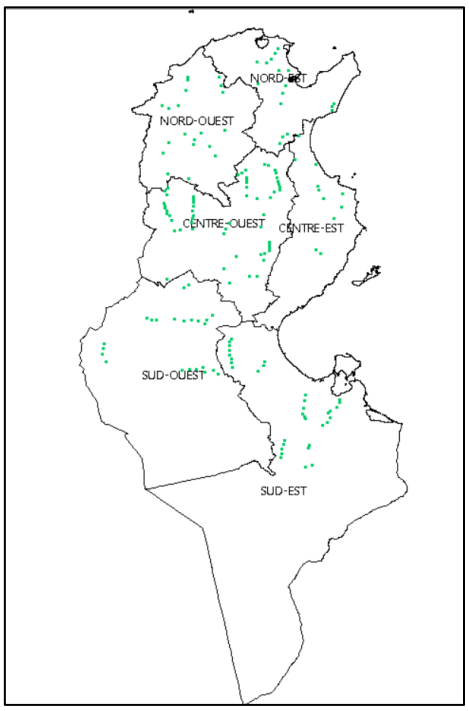


Figure 20: Architecture des nappes souterraines dans le modèle WEAP

Source : STUDI Eau 2050

[4] A. Ben Mammou et M.H. Louati (2007) : évolution temporelle de l'envasement des retenues de barrages de Tunisie. Revue des Sciences de l'Eau 20(2) 201-211

Les objets « ***Eau souterraine*** » sont caractérisés par les onglets de variables suivantes :

« Physique » : Regroupe les variables « ***Capacité de stockage*** », « ***Stockage initial*** », « ***Prélèvement maximal*** », « ***Recharge naturelle*** » et « ***Méthode*** » (Figure 21) :

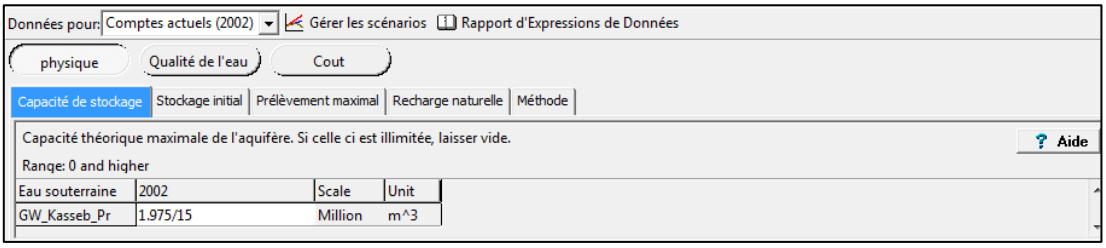


Figure 21 : Interface WEAP de mise à jour des données de la catégorie « Physique » des objets « Eau souterraine »

Source : STUDI Eau 2050

Les catégories « **Qualité de l'eau** » et « **Coût** » sont identiques à celles décrites ci-haut.

Gestion et valorisation par bassin versant/aquifère de l'irrigation

Les nœuds « ***bassin versant*** » sont utilisés pour l'estimation des besoins en eau agricole. Les principales catégories de données sont :

« Occupation du sol » : Permet de fixer les surfaces irriguées, les propriétés des cultures et des sols et l'efficacité des précipitations (Figure 22) :

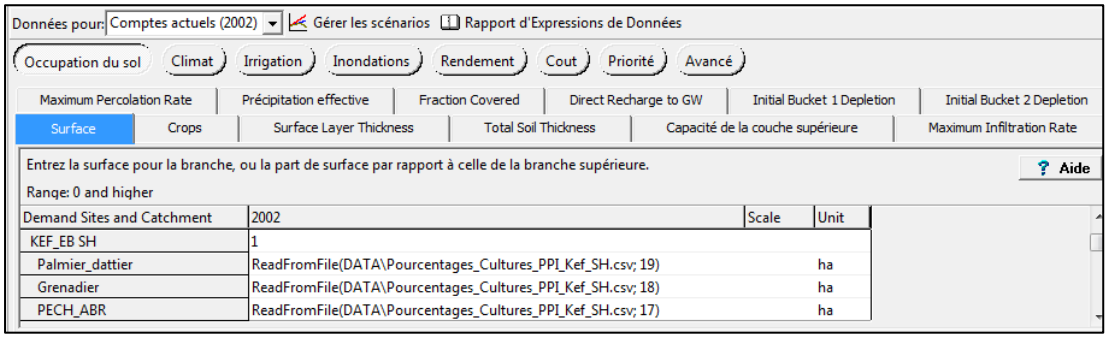


Figure 22 : Interface WEAP de mise à jour des données de la catégorie « Occupation du sol »

Source : STUDI Eau 2050

« Climat » : Regroupe les variables climatiques (Précipitations, températures, humidité de l'air, rayonnement, ensoleillement, vitesse du vent) et le positionnement de la station météorologique qui permettent de calculer l'évapotranspiration de référence (Figure 23).

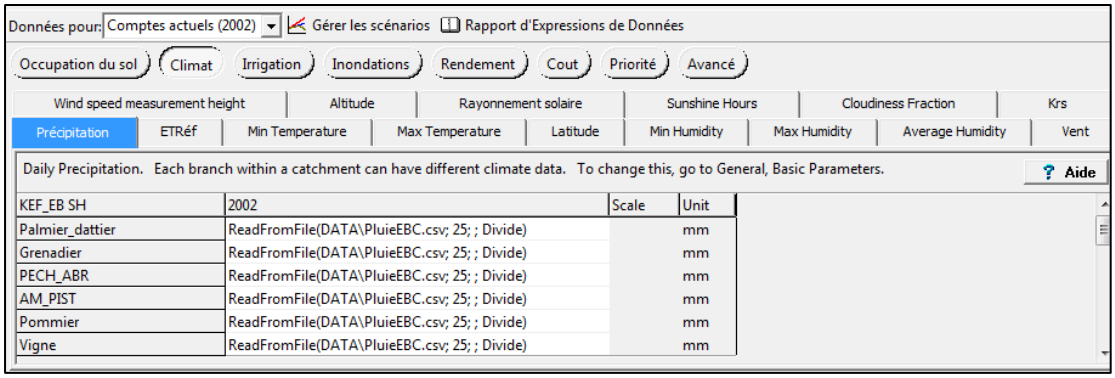


Figure 23 : Interface WEAP de mise à jour des données de la catégorie « Climat »

Source : STUDI Eau 2050

« Irrigation » : Permet de fixer la méthode de gestion de l'irrigation « ***Irrigation Schedule*** », la fraction du sol mouillée par l'irrigation « ***Fraction Wetted*** », l'efficience de l'irrigation « ***Irrigation Efficiency*** », les infiltrations « ***Loss to groundwater*** », les ruissellements « ***Loss to Runoff*** » et l'utilisation des ruissellements pour l'irrigation « ***Irrigation Use of Runoff*** » (Figure 24).

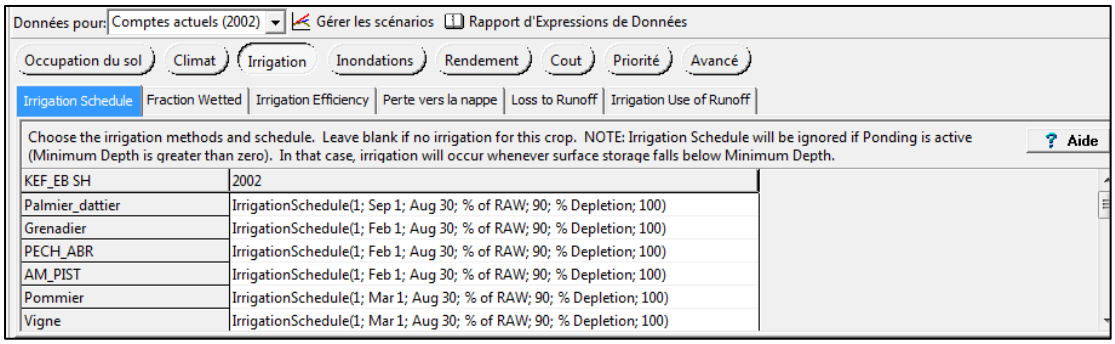


Figure 24 : Interface WEAP des données de la catégorie « Irrigation »

Source : STUDI Eau 2050

« Rendement » : Permet d'introduire les rendements maximaux des cultures retenues dans le modèle « ***Rendement maximal*** » ainsi que leurs prix de vente unitaires « ***Prix sur le marché*** » (Figure 25).

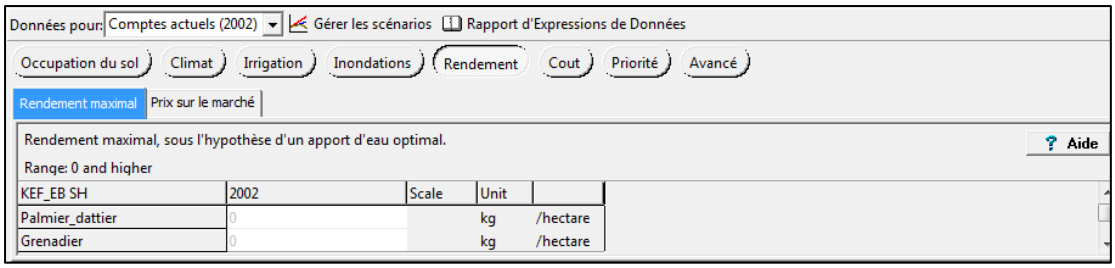


Figure 25 : Interface WEAP des données de la catégorie « Rendement »

Source : STUDI Eau 2050

« Coût » : Comme pour les sites de demande, cette catégorie permet d'introduire au modèle les données des variables coûts et revenus dues à l'usage de l'eau d'irrigation (Figure 26).

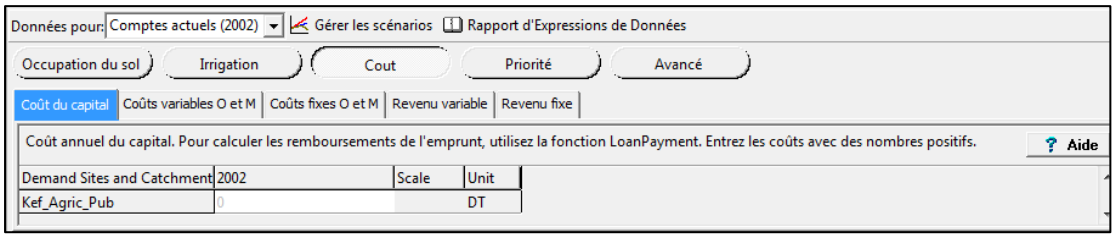


Figure 26 : Interface WEAP des données de la catégorie « Coût »

Source : STUDI Eau 2050

« Priorité » : voir ci-haut

« Avancé » : Permet de choisir parmi cinq méthodes de calcul demande en eau agricole (Figure 27).

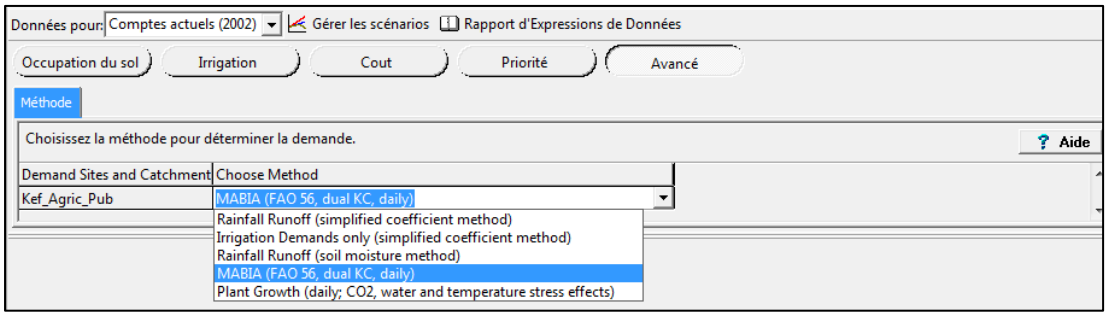


Figure 27 : Interface WEAP de choix de la méthode de calcul de la demande pour un « Bassin versant »

Source : STUDI Eau 2050

1.3.3 Alimentation en eau potable : Milieu urbain et rural

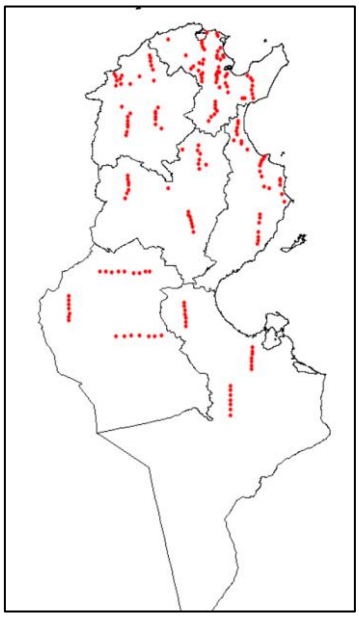


Figure 28 : Architecture des sites de demandes dans le modèle WEAP

Source : STUDI Eau 2050

Chaque objet « Site de demande » utilisé dans le modèle est caractérisé par un ensemble de variables regroupées en catégories : « ***Usage de l'eau*** », « ***Pertes d'eau et recyclage*** », « ***Gestion de la demande*** », « ***Qualité de l'eau*** », « ***Coût*** », « ***Priorité*** » et « ***Avancé*** » (Figure 29).

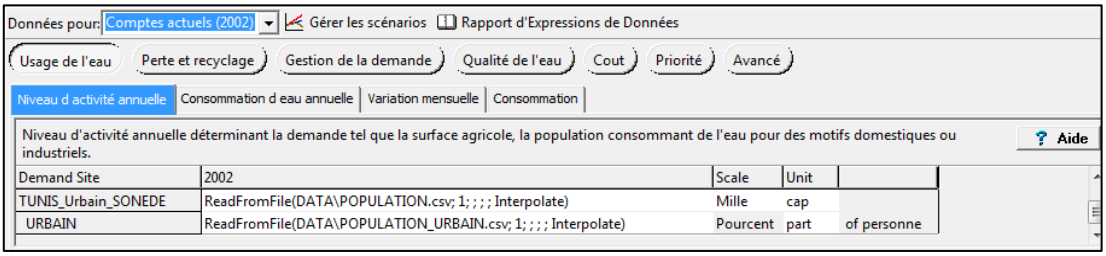


Figure 29 : Interface WEAP de mise à jour des données d'un site de demande.

Source : STUDI Eau 2050

« Usage de l'eau » : Regroupe les variables :

« ***Niveau d'activité annuelle*** » : Population ;

« ***Consommation d'eau annuelle*** » : Consommation spécifique en m3/an ;

« ***Variation mensuelle*** » : Le pourcentage de la consommation d'eau mensuelle ;

« ***Consommation*** » : Le pourcentage du besoin en eau calculé qui sera enlevé et ne retourne pas au cycle de l'eau selon le modèle (20%). Le reliquat (80%) retourne au système d'assainissement et/ou à un milieu récepteur.

« Pertes et recyclage » : Regroupe les variables « ***Niveau de perte*** » et « ***Niveau de recyclage*** ». Pour les sites de demandes d'eau potable alimentés par la SONEDE, il est tenu compte des données annuelles des rendements par district5 . Les taux de perte sont vérifiés et implémentés dans le modèle (Figure 30).

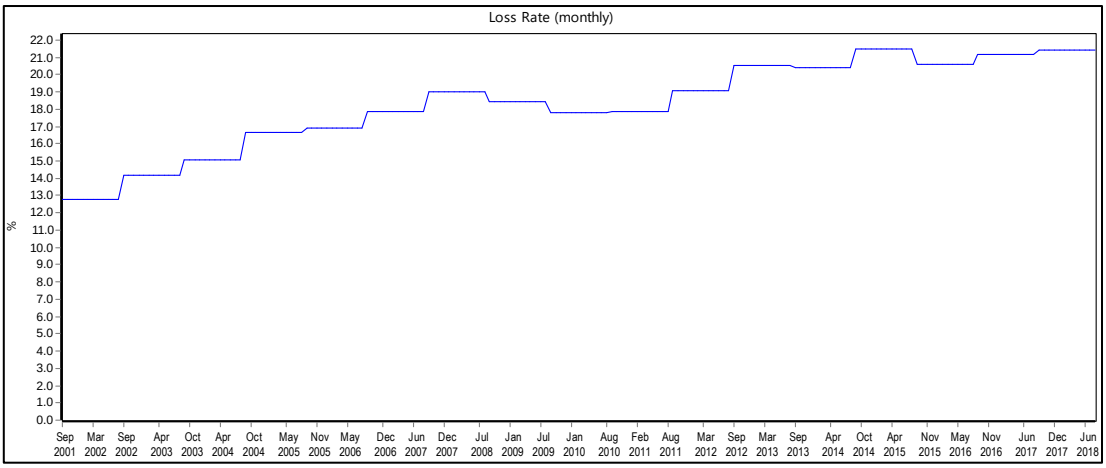


Figure 30 : Interface WEAP des données des taux de pertes des systèmes d'AEP (Exemple)

Source : STUDI Eau 2050

La variable « ***Niveau de recyclage*** » exprime le taux de recyclage de l'eau dans le site de demande, résultant en une baisse du rendement.

« Gestion de la demande (GSD) » : Regroupe les variables « ***Economie GSD*** » et « ***Coût de la GSD*** ».

« Qualité de l'eau » : Regroupe les variables relatives à la qualité de l'eau (Figure 31) :

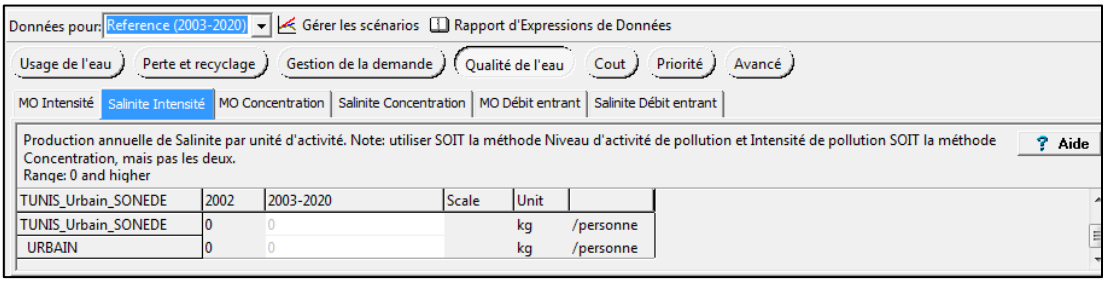


Figure 31 : Interface WEAP des données des variables de la qualité de l'eau des sites de demandes

Source : STUDI Eau 2050

[5] Rapport Statistique de la SONEDE, 2005-2018.

« Coût » : Regroupe les variables relatives à l'utilisation de l'eau à l'intérieur du site de demande : « ***Coût du capital*** », « ***Coût variables O et M*** », « ***Coût fixes O et M*** », « ***Revenu variable*** » et « ***Revenu fixe*** » (Figure 32) :

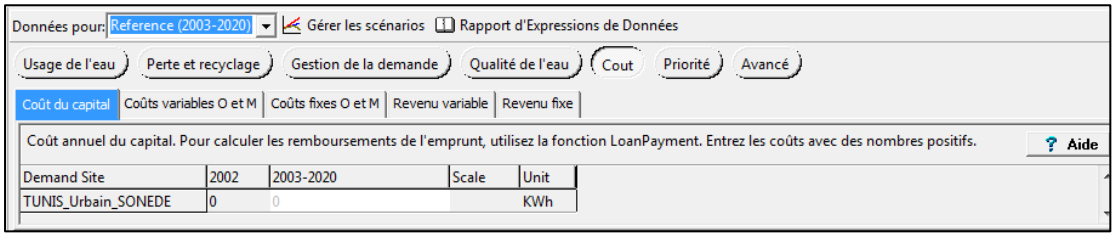


Figure 32 : Interface WEAP des variables coûts des sites de demandes

Source : STUDI Eau 2050

« Priorité » : Renferme la variable « ***Priorité de distribution*** », qui représente la priorité de satisfaction du site de demande. La priorité « 1 » signifie que le site est le plus prioritaire (Figure 33) :

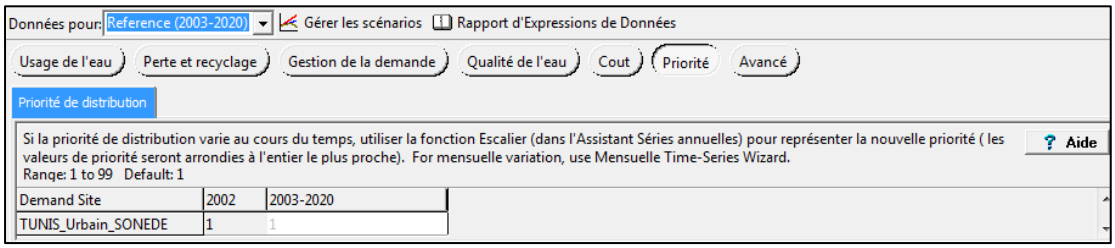


Figure 33 : Interface WEAP de la variable « Priorité de distribution » des sites de demandes

Source : STUDI Eau 2050

« Avancé » : Permet à l'utilisateur de choisir d'introduire les données au pas de temps mensuel ou annuel (Figure 34) :

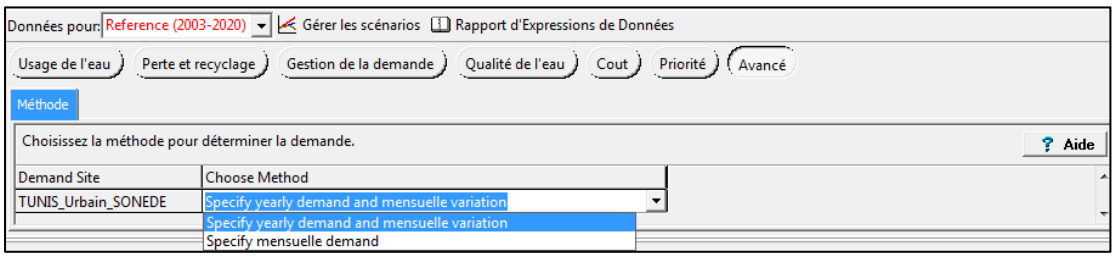


Figure 34 : Interface WEAP de choix de la méthode de calcul des demandes

Source : STUDI Eau 2050

1.3.4 Assainissement

Stations d'épuration

Vingt-quatre (24) grappes « ***Station d'épuration*** » à raison d'une grappe par gouvernorat ont été introduites dans le modèle (un nœud par grappe).

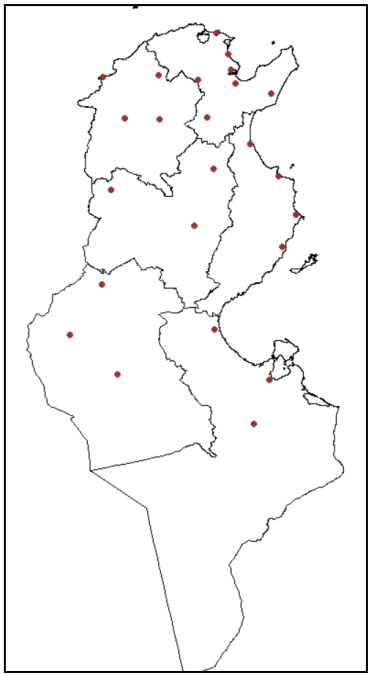


Figure 35 : Architecture des STEP dans le modèle WEAP

Source : STUDI Eau 2050

Les objets « ***Station d'épuration*** » dans le modèle sont caractérisés par les catégories de variables suivantes : **« Traitement »** : Permet de fixer la « ***Capacité journalière*** » de traitement, le « ***Volume traité*** » d'eau par la station, Qualité des eaux à l'entrée et les performances en dépollution.

« Capacité journalière »

La variable « ***Capacité journalière*** » exprime la capacité de traitement (m3/jour). Un taux de saturation des STEP de 80% a été adopté (tolérance à l'entrée).

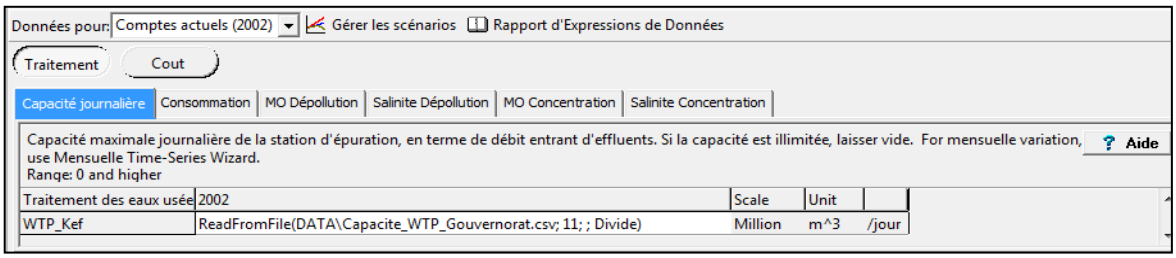


Figure 36 : Interface WEAP de mise à jour des données de la catégorie « Traitement » des objets « Station d'épuration »

Source : STUDI Eau 2050

Une station de traitement reçoit les eaux usées à partir des sites de demande (un ou plusieurs), le débit rentrant est défini par les liaisons de retour, est ce suivant les taux de raccordement des réseaux de l'ONAS et les liaisons de retour matérialisé entre un bassin versant et la station de traitement, le cas échéant.

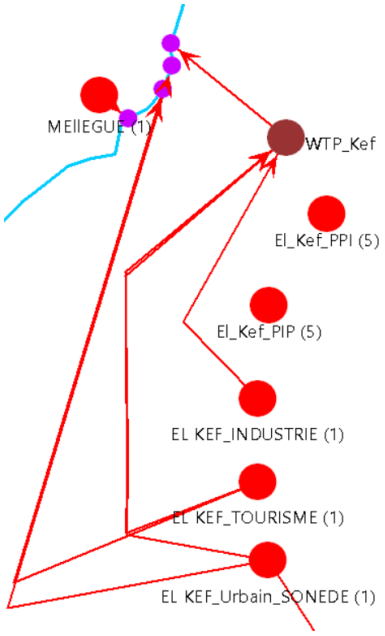


Figure 37: exemple de connexion entre un site de demande et l'objet STEP tels qu'implémenté dans le modèle

Source : STUDI Eau 2050

L'équation suivante présente la méthode de calcul des débits entrants à la STEP :

$$TreatmentPlantInflow_{TP} = \sum_{DS} DSReturnLinkOutflow_{DS,TP} + \sum_{Catch} CatchmentRunoffLinkOutflow_{Catch,TP}$$

Dans le cas où le débit rentrant à la STEP, dépasse la capacité de traitement, l'excédent sera rejeté automatiquement dans le milieu récepteur suivant l'équation suivante.

$$FractionTreated_{TP} = Minimum(\ 1,\ TreatmentPlantCapacity_{TP} / TreatmentPlantInflow_{TP}\ )$$

« ***Consommation*** » :

La fraction consommée au cours du cycle de traitement, qui disparaît du système, est considérée négligeable en considérant que les pertes au niveau des STEP sont minimes (entrées ≈ sorties).

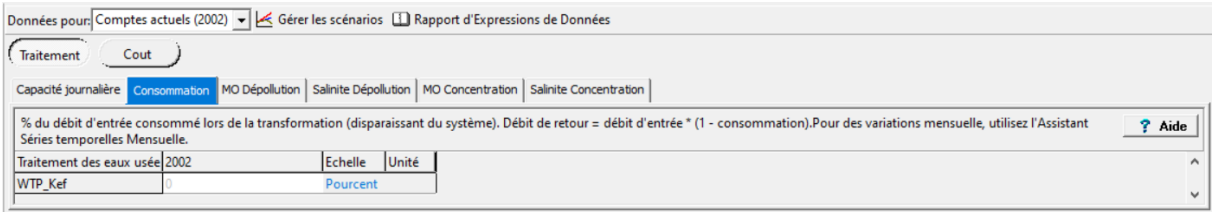


Figure 38 : Interface WEAP de mise à jour des données du paramètre « Consommation » des objets « Station d'épuration »

Source : STUDI Eau 2050

« ***MO Dépollution & MO concentration*** » :

Le processus de traitement peut être modéliser par deux méthodes différentes : soit en spécifiant le taux d'élimination de la matière organique (DBO_5), soit en précisant la concentration en MO à la sortie de la station.

Taux d'élimination de la matière organique :

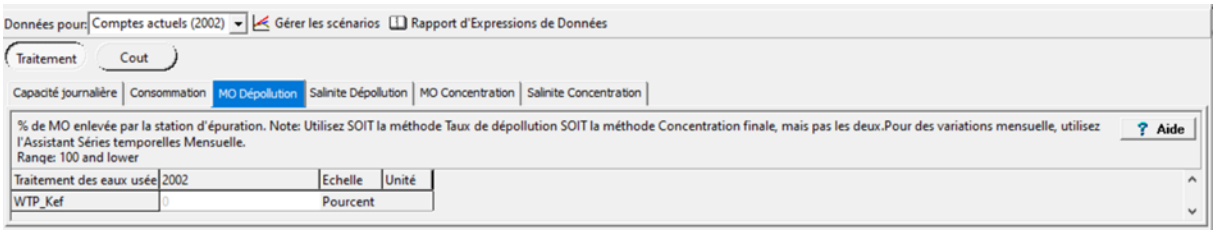


Figure 39 : Interface WEAP de mise à jour des données du paramètre « MO depollution » des objets « Station d'épuration »

Source : STUDI Eau 2050

Une partie de la MO sera éliminée par la station de traitement, et le reste imprimera la qualité à la sortie de la STEP.

$$TreatmentPlantPollOutflow_{TP,p} = (1 - RemovalRate_{TP,p} \times FractionTreated_{TP}) \times TreatmentPlantPollInflow_{TP,p}$$

Concentration en MO à la sortie :

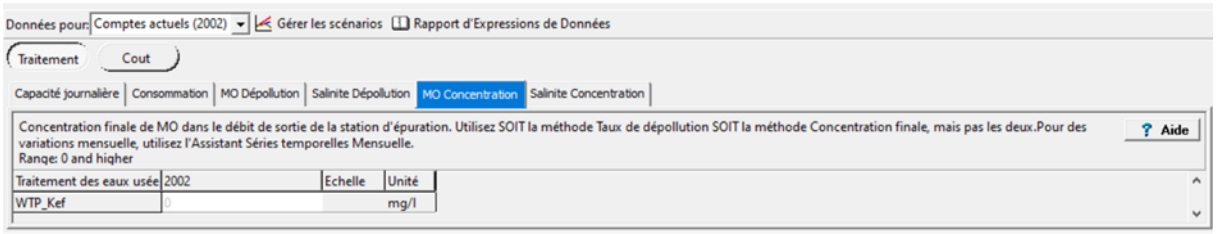


Figure 40 : Interface WEAP de mise à jour des données du paramètre « MO Concentration » des objets « Station d'épuration »

Source : STUDI Eau 2050

La concentration du débit sortant sera telle que spécifiée dans les données introduites. Si le débit rentrant à la station dépasse sa capacité, l'eau traitée à la concentration spécifiée sera mélangée avec la fraction non traitée.

$$TreatmentPlantPollOutflow_{TP,p} = OutflowConcentration_{TP,p} \times TreatmentPlantOutflow_{TP} \times FractionTreated_{TP} + TreatmentPlantPollInflow_{TP,p} \times (1 - FractionTreated_{TP})$$

« ***Salinité Dépollution & Salinité concentration*** » :

Le processus est similaire à celui décrit pour l'élimination de la matière organique.

Salinité dépollution :

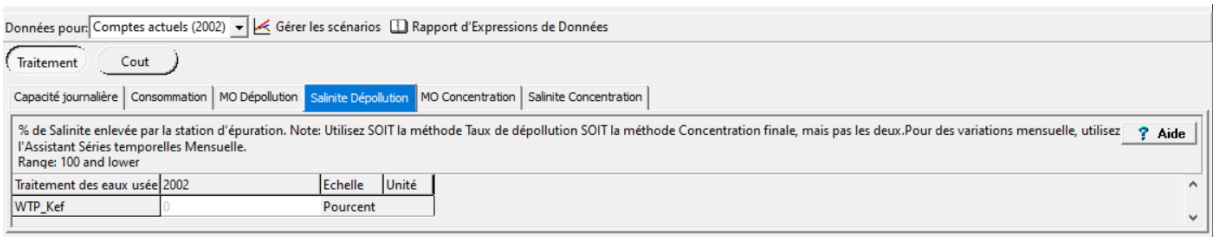


Figure 41 : Interface WEAP de mise à jour des données du paramètre « salinité dépollution » des objets « Station d'épuration »

Source : STUDI Eau 2050

Salinité Concentration :

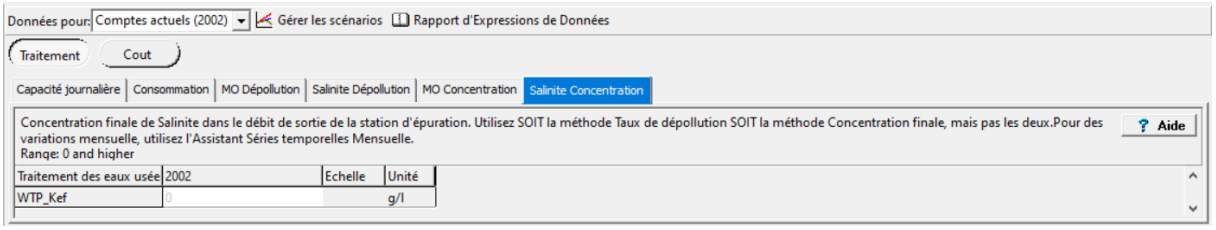


Figure 42 : Interface WEAP de mise à jour des données du paramètre « salinité concentration » des objets « Station d'épuration »

Source : STUDI Eau 2050

La catégorie « ***Coût*** » est identique à celle décrite pour les sites de demandes.

1.3.5 Autres sources non conventionnelles

1.3.5.1 Dessalement

Les objets « ***Autre source*** » sont caractérisés par les catégories de variables suivantes :

« Débits entrant et sortant » : Permet de définir la variable « ***Débit entrant*** » correspondant au débit instantané alimentant la source ou aussi la capacité de production (Figure 43) :

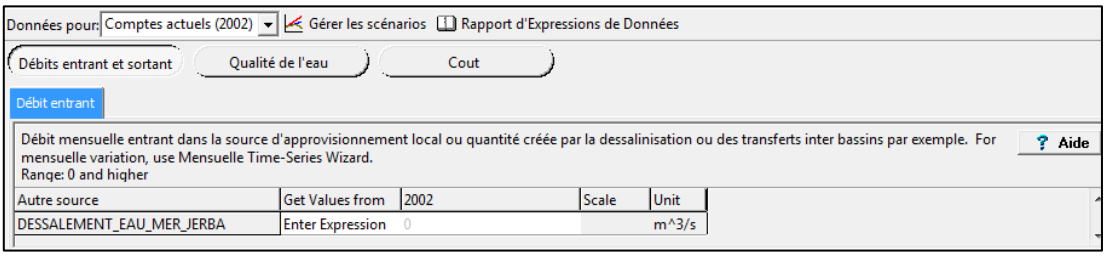


Figure 43 : Interface WEAP de mise à jour des données de la catégorie « Débit entrant et sortant » des objets « Autre source ».

Source : STUDI Eau 2050

Les catégories « ***Qualité de l'eau*** » et « ***Coût*** » sont identiques à celles décrites ci-haut.

1.3.5.2 Réutilisation des eaux traitées

La Réutilisation des eaux usées est schématisée dans le modèle par les liaisons de transmission entre les sites de traitement « Station d'épuration » et les sites de demandes (Périmètres irriguées, terrain de golf, industrie, espaces verts, etc.).

Elle est caractérisée par la variable « Pourcentage max de réutilisation » par site de traitement qui sera mis à la disposition des différents secteurs (Figure 44).

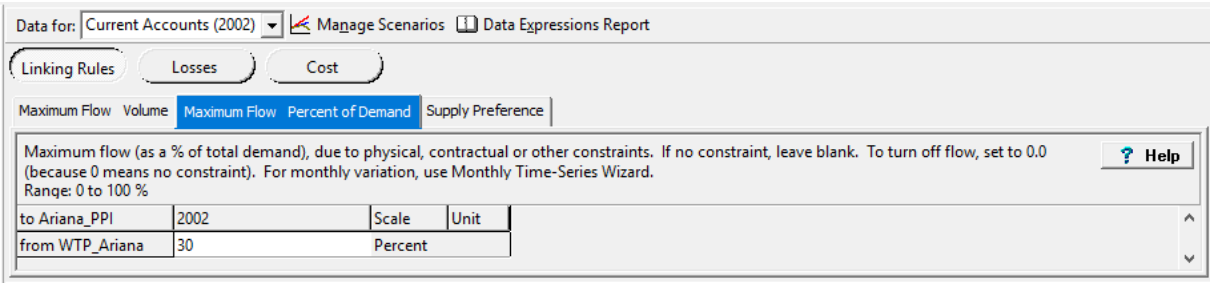


Figure 44 : Interface WEAP de mise à jour des données de la catégorie « Réutilisation » pour le site de traitement Ariana

Source : STUDI Eau 2050

La catégorie « ***Coût*** » est identique à celle décrite pour les sites de demandes.

1.3.6 Prévision de la demande en eau

Liaisons de transmission

Les objets « ***Liaison de transmission*** » sont caractérisés par les onglets de variables suivantes :

« Règles de liaison » : Regroupe les variables « ***Débit maximal volume*** », « ***Débit maximal en pourcentage de la demande*** » et « ***Préférence d'approvisionnement*** » (Figure 45).

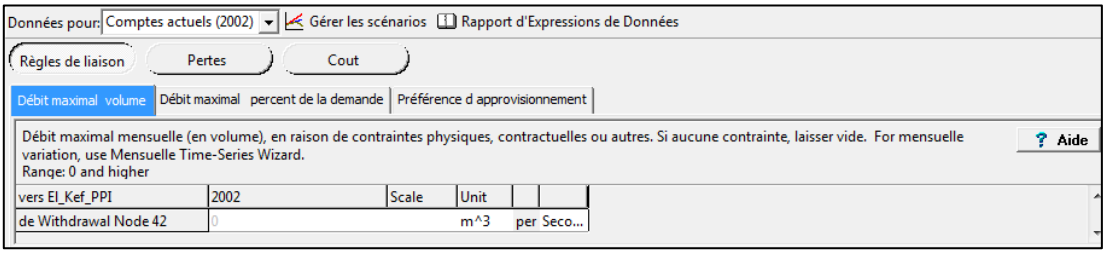


Figure 45 : Interface WEAP de la catégorie « Règles de liaison » des objets « Liaison de transmission »

Source : STUDI Eau 2050

« Pertes » : Regroupe les variables « ***Taux de perte*** » et « ***Perte vers la nappe*** » (Figure 46).

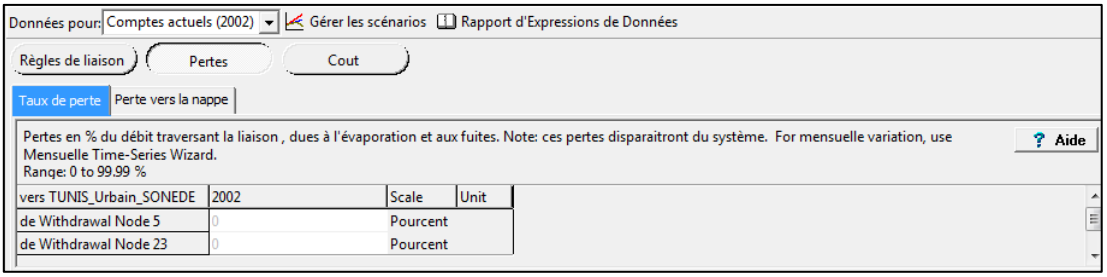


Figure 46 : Interface WEAP de mise à jour des données de la catégorie « Pertes » des objets « Liaison de transmission »

Source : STUDI Eau 2050

La catégorie « **Coût** » est identique à celle décrite pour les sites de demandes.

Déviation

Les objets « ***Déviation*** » sont caractérisés par les catégories de variables suivantes :

« Débits entrant et sortant » : Regroupe les variables « ***Déviation maximale*** » et « ***Fraction Diverted*** » qui ne devrait pas être utilisées en même temps (Figure 47) :

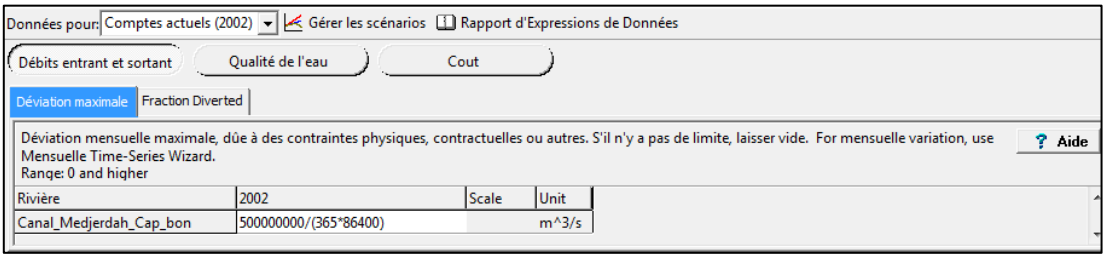


Figure 47 : Interface WEAP de mise à jour des données de la catégorie « Débits entrant et sortant » des objets « Déviation ».

Source : STUDI Eau 2050

Les catégories « ***Qualité de l'eau*** » et « ***Coût*** » sont identiques à celles décrites pour les sites de demandes.

Débit de retour

Les objets « ***Déviation*** » sont caractérisés par les onglets de variables suivantes :

« Débits entrant et sortant » : Regroupe les variables « ***Routage du débit de retour*** », « ***Pertes dans les liaisons de retour*** », « ***Pertes vers la nappe*** » et « ***Gain d'eau souterraine*** ».

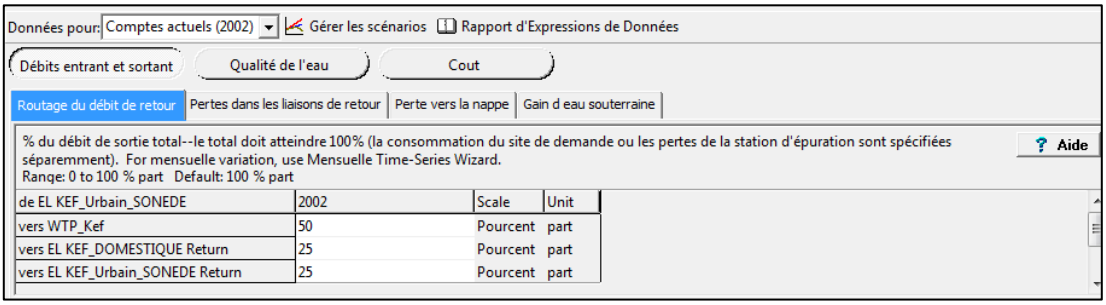


Figure 48 : Interface WEAP de mise à jour des données de la catégorie « Débits entrant et sortant » des objets « Débits de retour »

Source : STUDI Eau 2050

« Qualité de l'eau » : Regroupe les variables « ***Salinité Dégradation*** » et « ***MO Dégradation*** » (Figure 49).

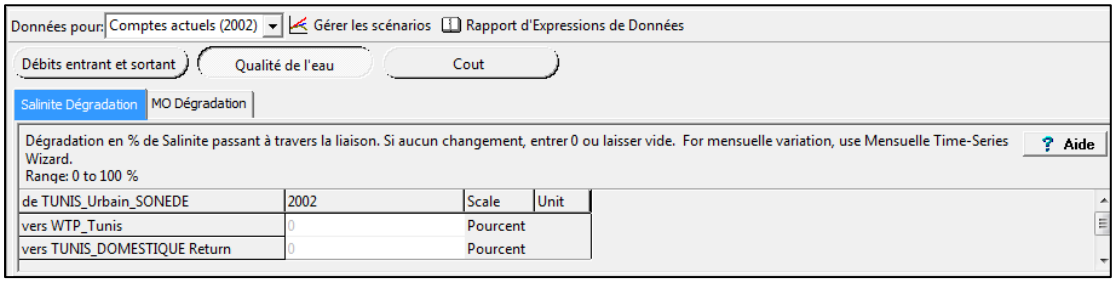


Figure 49 : Interface WEAP de mise à jour des données de la catégorie « Qualité de l'eau » des objets « Débits de retour »

Source : STUDI Eau 2050

La catégorie « ***Coût*** » est identique à celle décrite pour les sites de demandes.

1.4 CONSTRUCTION DU MODELE : DONNEES IMPLEMENTEES

Les ressources en eau sont ventilées en cinq catégories à savoir :

Les rivières (non mobilisées) ;

Les réservoirs ;

Les nappes phréatiques ;

Les nappes profondes ;

Les eaux non conventionnelles (Eaux usées traitées, Eaux de mer dessalées, etc.).

L'utilisation des ressources en eau pour des besoins de consommation est ventilée en sept catégories à savoir :

L'eau potable urbaine gérée par la SONEDE ;

L'eau potable rurale gérée par la SONEDE ;

L'eau potable rurale gérée par le GR ;

L'eau destinée à l'usage industriel ;

L'eau destinée au secteur touristique ;

L'eau destinée à l'usage agricole dans les PPI (périmètres publics irrigués) ;

L'eau destinée à l'usage agricole dans les PIP (périmètres irrigués privés).

1.4.1 Eaux de surface

Ressources

Les ressources en eaux de surface sont modélisées par des « ***Rivière*** » (Oueds) et des réservoirs de stockage (Barrages).

Les apports en eaux sont introduits comme donnée d'entrée au modèle. Pour les 63 « ***Rivière*** » schématisées, des séries mensuelles entre 2002 et 2018 ont été introduites par cours d'eau. La vérification des apports arrivant au niveau des barrages s'est basée sur une analyse comparative des apports fournis par les gestionnaires des barrages avec les volumes mesurés au niveau des stations hydrométriques les plus représentatives de chaque bassin versant.

La figure ci-après présente la série temporelle adoptée en amont de Medjerda.

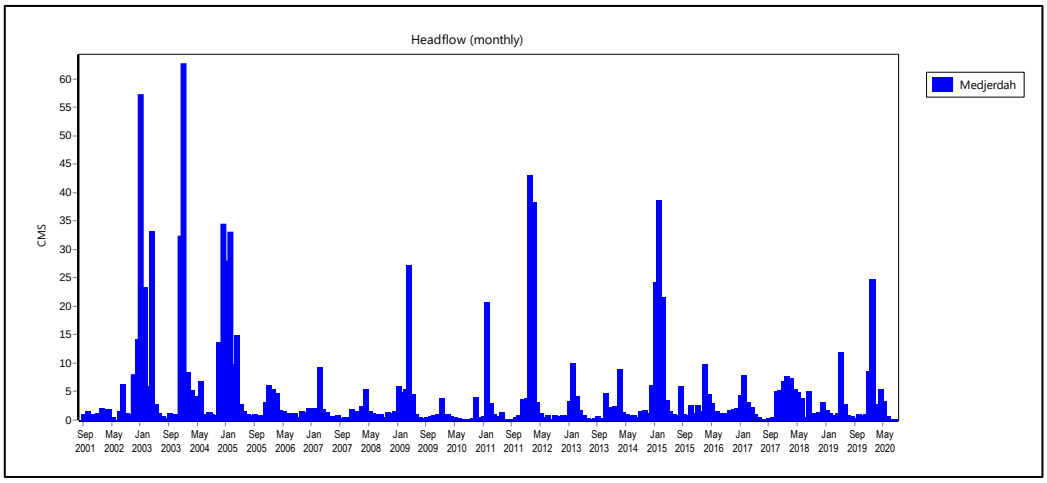


Figure 50 : La série temporelle adoptée en amont de Medjerda

Source : STUDI Eau 2050

Les données introduites au niveau de chaque barrage correspondent aux :

Capacité à la cote RN en 2002 ;

Capacité de l'évacuateur de crue ;

Courbe Hauteur/Volume en 2002 ;

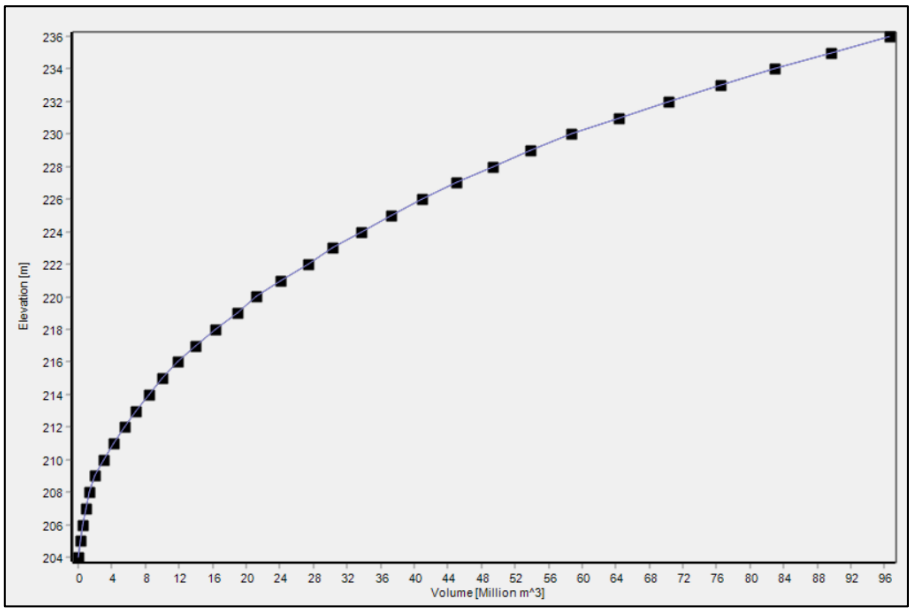


Figure 51 : Courbe Hauteur/Volume du barrage Nebhana

Source : STUDI Eau 2050

Séries mensuelles de l'évaporation nette sur la retenue d'eau (2002-2015) ;

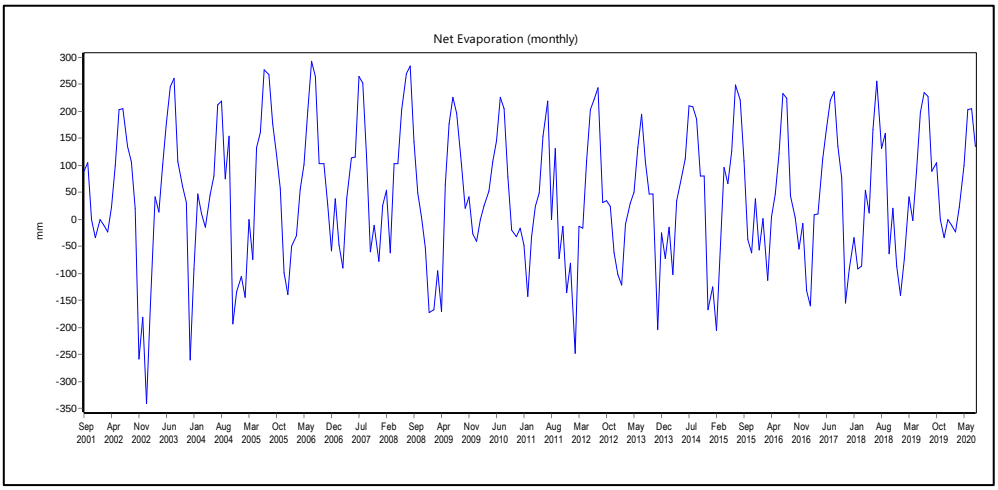


Figure 52 : Evaporation mensuelle (2002-2015) au barrage Bouheurtma

Source : STUDI Eau 2050

Les infiltrations au niveau des barrages ;

Dans WEAP, un réservoir de stockage est divisé en quatre zones à savoir : la zone de contrôle des eaux, la zone de conservation, la zone tampon et la zone inactive. Ces quatre zones sont définies par barrage et ajustées pour la calibration.

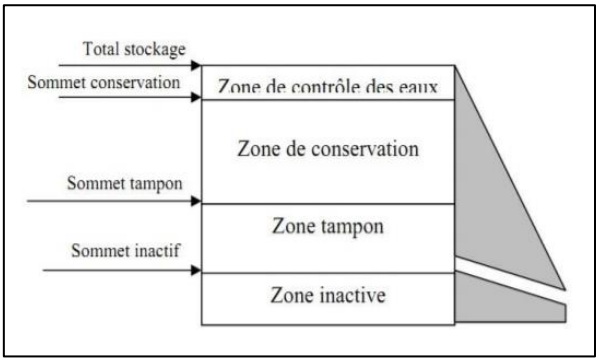


Figure 53 : Différentes zones d'une retenue dans WEAP (SEI, 2017)

Source : STUDI Eau 2050

Liaisons hydrauliques pour le transfert d'eau inter-régional

Des objets WEAP « ***Liaison de transmission*** » et « ***Déviation*** » sont créés pour modéliser les axes de transferts sur la base des données de gestion des barrages et des infrastructures hydrauliques (pompage et de transfert) gérés par la SECADENORD (conduites et canaux). La figure 54 présente l'axe de transfert entre les barrages Sidi Barrak et Sedjnene.

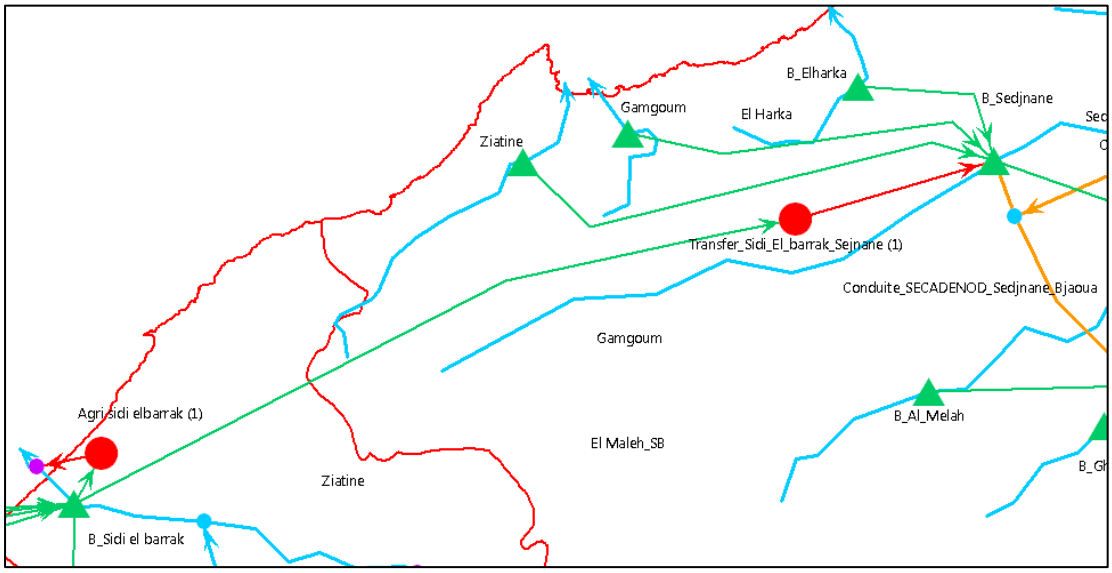


Figure 54 : Transfert d'eau entre les barrages Sidi Barrak et Sedjnene

Source : STUDI Eau 2050

La Figure 55**Figure** présente les volumes mensuels transférés de Sidi Barrak à Sedjnene durant la période 9/2002 – 8/2018[6].

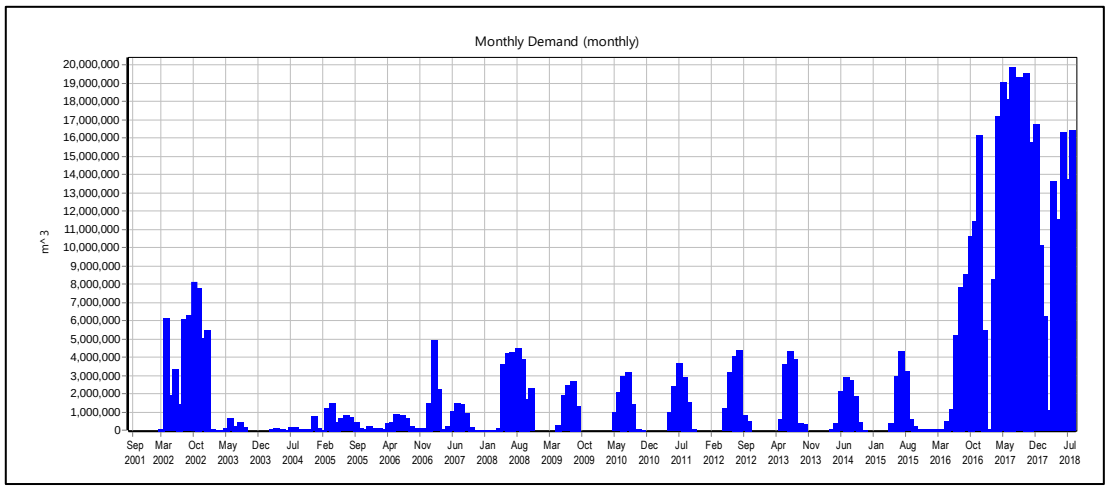


Figure 55 : Volumes mensuels transférés du barrage Sidi barrak à Sedjnene

Source : STUDI Eau 2050

Cet axe assure le transfert d'une eau de bonne qualité (salinité moyenne de 0.5 g/l), mais qui nécessite un effort financier lié aux dépenses énergétiques additionnelles pour pomper l'eau jusqu'au réservoir Sedjnene.

Le barrage Sidi Salem mobilise une grande proportion des eaux du Nord et assure aussi son transfert au barrage Aroussia gravitairement. Le mélange des eaux des deux axes de transfert alimente le « Canal_Medjerda_Cap_bon » (Figure 56).

[6] Source de données : SECADENORD et DGBGTH.

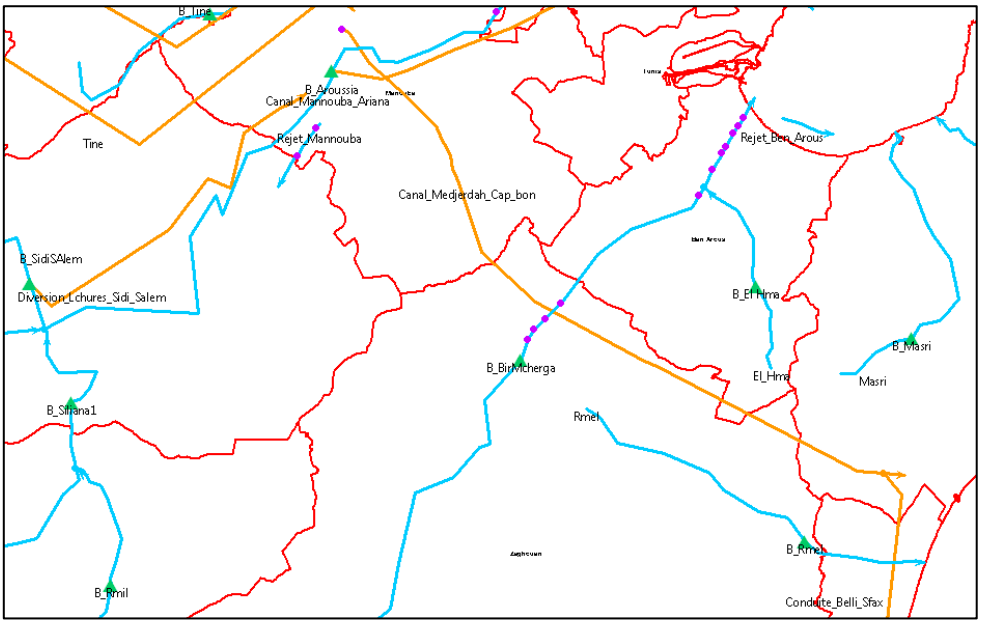


Figure 56 : Transfert d'eau du barrage Sidi Salem au barrage Aroussia

Source : STUDI Eau 2050

Deux autres axes de transfert assurent l'approvisionnement du Grand Tunis en eau, de bonne qualité, à partir des barrages Beni Mtir et Kasseb (Figure 57). Les deux conduites Oued Ellil et Kasseb sont gravitaires et ramènent des eaux de bonne qualité (Salinité moyenne 0.5 g/l).

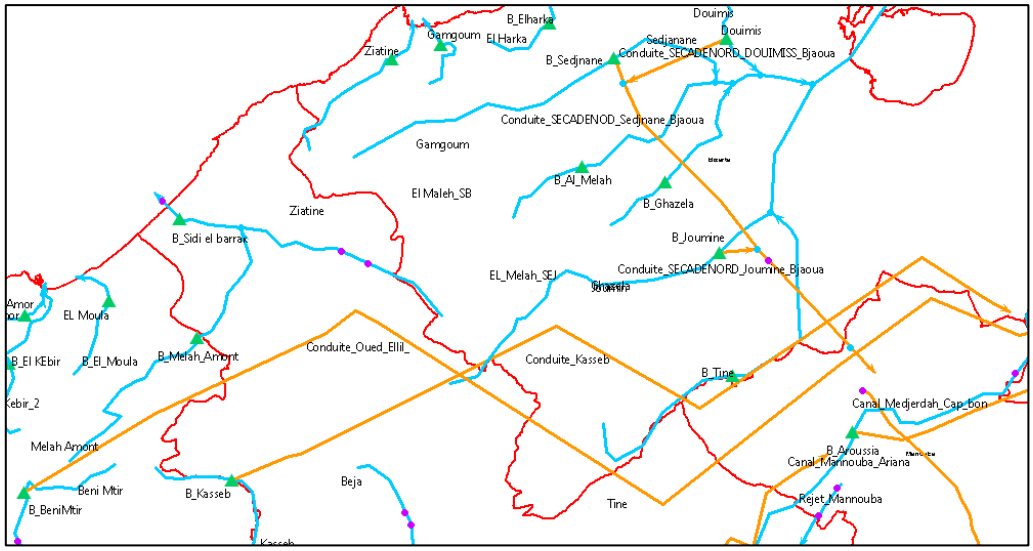


Figure 57 : Axes de transfert d'eau des barrages Beni Mtir et Kasseb

Source : STUDI Eau 2050

Le transfert vers le Centre-Est est schématisé dans le modèle comme suit (Figure 58) :

Transfert « Belli – Sfax » : Conduites alimentée en eau potable traitée par la station Belli, revenant à la SONEDE. Cette conduite assure l'AEP des villes du Cap Bon, le Sahel jusqu'à Sfax.

Transfert « Bou Hafna – Sousse » : Conduites alimentant en eau potable la région de Sousse à partir des aquifères de Kairouan (Bou Hafna, Chrichira).

Conduite « Nebhana – Sahel » : Alimentée en eau par le barrage Nebhana et assure l'alimentation en eau d'irrigation des PPI de Kairouan, Sousse, Monastir et Mahdia.

Le dernier axe de transfert est celui alimentant la région de Sfax par les eaux des aquifères de Jelma.

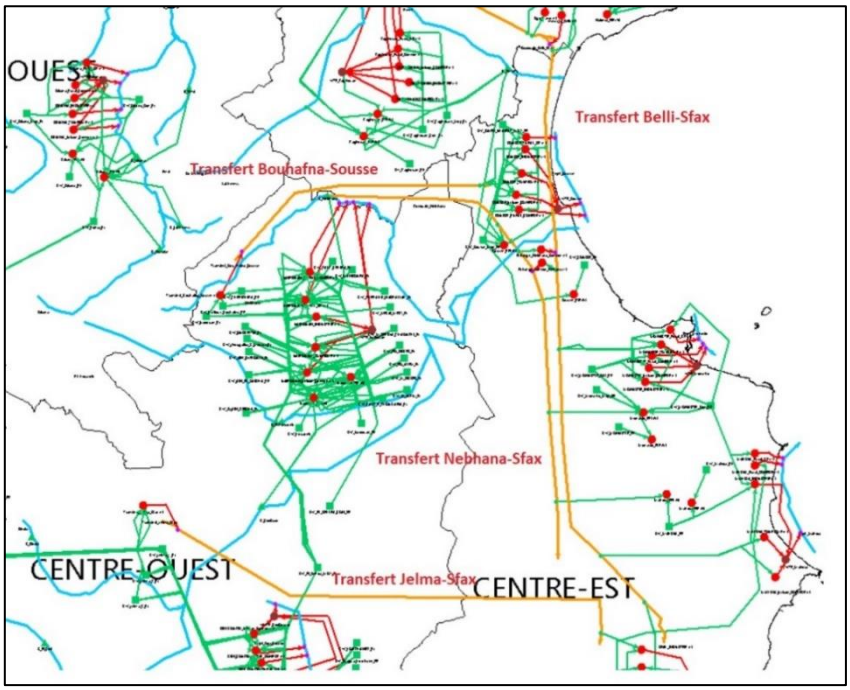


Figure 58 : Axes de transfert d'eau pour le centre Est

Source : STUDI Eau 2050

Le système de transfert des eaux de Nabhana (géré par la SECADENORD) alimente les périmètres irrigués situés à Sousse, Monastir et Mahdia. Globalement, les surfaces irriguées à partir du transfert des eaux de Nabhana ont augmenté de 49% entre 1970 et 2013. Cette augmentation a eu lieu principalement à partir de 2011 où tous les Gouvernorats ont augmenté la pression sur les ressources en eau de la SECADENORD en augmentant sensiblement les surfaces irriguées (des PPI). L'augmentation la plus importante a été enregistrée au niveau du Gouvernorat de Kairouan (+87%)7.

La SECADENORD effectue des échanges importants avec la SONEDE de la façon suivante :

Durant la saison estivale (de pointe pour l'eau potable), la SECADENORD fournit de l'eau à la SONEDE à travers les piquages de Harkoussia et d'Ezzouhour ;

La SECADENORD tire en contre partie du réseau SONEDE, en dehors de la saison de pointe, des volumes non négligeables pour satisfaire la demande des périmètres irrigués qu'elle dessert.

(A reprendre selon l'explication SECADENORD/SONEDE)

Les volumes d'eau alloués à la SONEDE ont presque triplé (285%) à partir de 2012. Une situation qui s'explique essentiellement par la crise d'eau potable de l'été 2012.

1.4.2 Eaux souterraines

Les ressources en eaux souterraines représentent la source principale d'approvisionnement dans les régions arides du pays. Dans le modèle WEAP, les nappes souterraines sont schématisées par des carreaux verts.

Lors de la phase de diagnostic, 520 nappes sont inventoriées totalisant environ 118 systèmes aquifères :

201 Nappes phréatiques ;

302 Nappes profondes ;

17 Nappes fossiles.

[7] STUDI INTERNATIONAL (2014) : Etablissement d'un diagnostic concerté et bilans actualisés des trois barrages de Kairouan dans un contexte de changement climatique.

Dans l'optique d'alléger le temps de simulation, qui dépasse parfois les 16 heures. Nous avons adopté une catégorisation des nappes selon des critères concordants sur :

La proximité géographique ;

La catégorie d'exploitation : nappes sous-exploitées, nappes en équilibre et nappes surexploitées ;

La typologie des nappes : nappes phréatiques ou nappes profondes ;

La salinité : bonne, moyenne, saline ;

Le type d'usage.

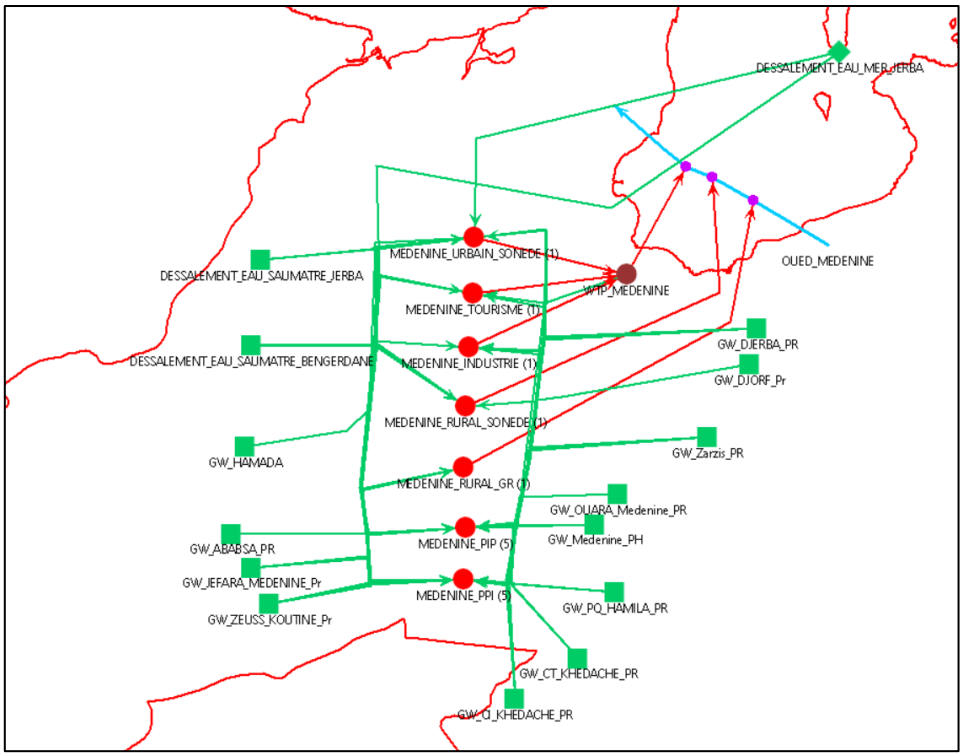


Figure 59 : Exemple d'interaction entre les ressources en eaux et les centres de demandes à Medenine

Source : STUDI Eau 2050

Cette agrégation nous a permis de considérer 164 nœuds « ***Groundwater*** » qui englobent l'information des 528 nappes. La majorité des nœuds correspond à des systèmes aquifères, les autres sont des nappes isolées en raison de leurs caractères sensibles (surexploitées, salinisées, isolées, etc.)

1.4.3 Gestion et valorisation par bassin versant de l'irrigation

Les données considérées et intégrées dans le modèle pour la partie agricole sont celles publiées par le ministère chargé de l'agriculture disponibles pour la période 2002-2015.

Il s'agit d'une période assez longue et de statistique suffisamment exhaustives et représentative pour refléter une image assez fidèle et actualisée de l'occupation des sols dans les périmètres irrigués (année sèche, année moyenne et année humide).

Afin d'optimiser le modèle d'allocation pour l'irrigation, deux démarches ont été croisées pour confronter :

Les données réelles issues des statistiques régionales ;

La démarche algorithmique de la FAO qui offre la possibilité d'une simulation paramétrée et régionalisable.

Les graphiques ci-après illustrent les sorties du modèle pour la période historique considérée.

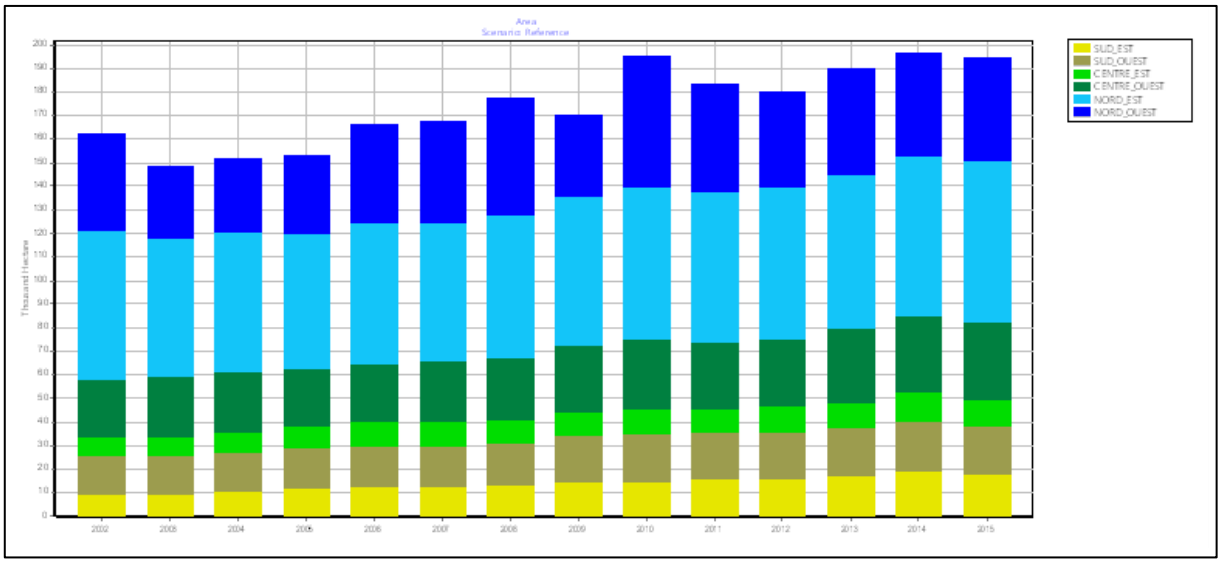


Figure 60 : Surface Agricole annuelle des PPI (2002-2015)

Source : STUDI Eau 2050

La surface des PPI la plus importante se trouve dans le Nord-Est (près de 70 000 ha en 2015). Les PIP les plus développés en termes de superficie se localisent dans le Centre-Ouest (près de 115 000 ha en 2015).

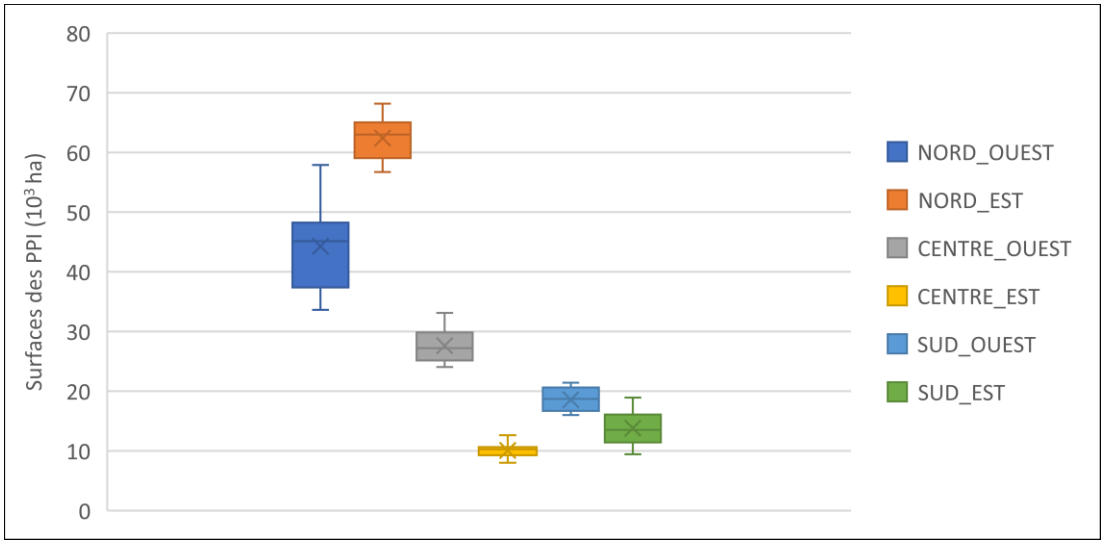


Figure 61 : Surface Agricole annuelle des PPI (2002-2015)

Source : STUDI Eau 2050

Tableau 2 : Répartition de la surface agricole des PPI par région pour 2005,2010 et 2015

Année / Régions	2005	2010	2015
NORD_OUEST	36,1	57,9	47,3
NORD_EST	56,7	64,8	68,2
CENTRE_OUEST	24,7	29,4	33,1
CENTRE_EST	9,5	10,6	11,0
SUD_OUEST	16,8	20,8	20,6
SUD_EST	11,7	14,1	17,5
Total	155,6	197,6	197,7

Source : STUDI Eau 2050

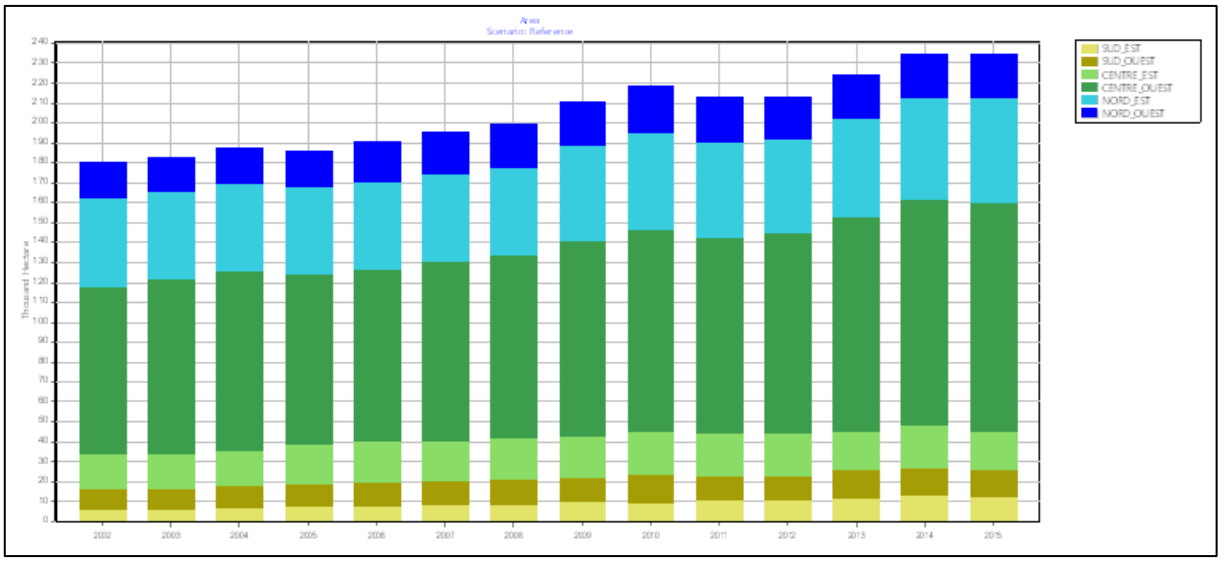


Figure 62 : Surface Agricole annuelle des PIP (2002-2015)

Source : STUDI Eau 2050

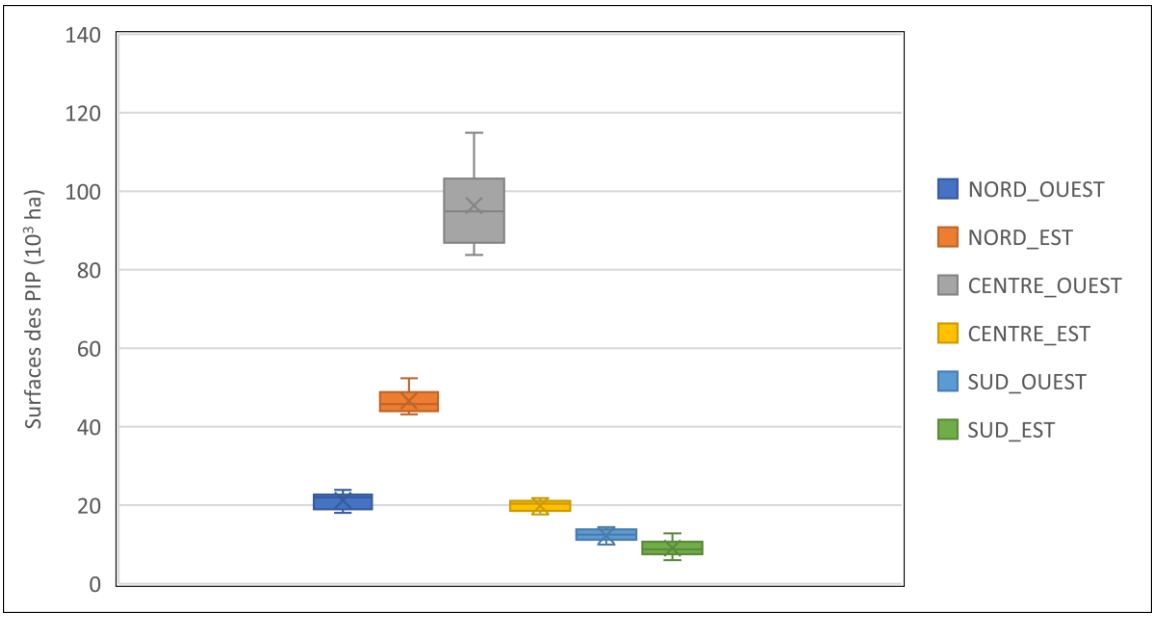


Figure 63 : Surface Agricole annuelle des PIP (2002-2015)

Source : STUDI Eau 2050

Tableau 3 : Répartition de la surface agricole des PPI par région pour 2005,2010 et 2015

Année / Régions	2005	2010	2015
NORD_OUEST	19,1	23,9	22,6
NORD_EST	43,2	48,5	52,3
CENTRE_OUEST	86,0	101,7	114,9
CENTRE_EST	19,3	21,1	19,1
SUD_OUEST	11,3	14,4	14,0
SUD_EST	7,7	9,0	12,0
Total	186,6	218,6	235,1

Source : STUDI Eau 2050

1.4.4 Alimentation en eau potable : Milieu urbain et rural

Les demandes en eau potable, industrielle et touristique sont dotées de la priorité de distribution « 1 » et sont schématisées par cinq nœuds « ***Site de demande*** », représentant :

La population desservie par la SONEDE en milieu urbain ;

La population desservie par la SONEDE en milieu rural ;

La population desservie par les GDA en milieu rural ;

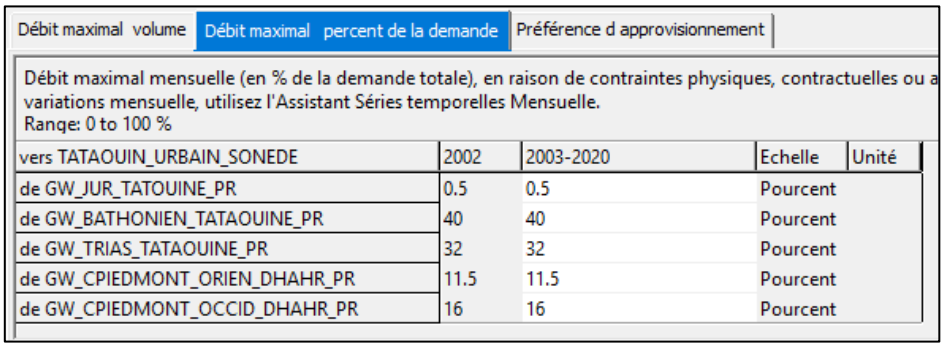
Les unités industrielles ;

Les unités touristiques.

Pour la période 09/2002 – 08/2015, 8 352 données relatives aux demandes d'eau potable ont été implémentées dans le modèle.

Liaisons hydrauliques pour l'approvisionnement des sites de demandes et les rejets des eaux usées

Il est utilisé des objets « Liaison de transmission » pour l'approvisionnement des sites de demandes à partir des sources d'eau. Sur la base des informations officielles disponibles8, il est estimé le pourcentage de contribution de chaque liaison/source dans la desserte de chaque site de demande, tout en leur affectant la même préférence d'approvisionnement. La figure 64 est un exemple d'approvisionnement du site de demande « Tataouin_Urbain_SONEDE » par cinq liaisons de transmission. Selon cette configuration, chaque liaison apportera un pourcentage de la demande du site de demande, tant que la ressource en eau ou les contraintes définies par l'utilisateur sur le pompage le permet.


Débit maximal volume | Débit maximal percent de la demande | Préférence d approvisionnement

Débit maximal mensuelle (en % de la demande totale), en raison de contraintes physiques, contractuelles ou a
variations mensuelle, utilisez l'Assistant Séries temporelles Mensuelle.
Range: 0 to 100 %

vers TATAOUIN_URBAIN_SONEDE	2002	2003-2020	Echelle	Unité
de GW_JUR_TATOUINE_PR	0.5	0.5	Pourcent	
de GW_BATHONIEN_TATAOUINE_PR	40	40	Pourcent	
de GW_TRIAS_TATAOUINE_PR	32	32	Pourcent	
de GW_CPIEDMONT_ORIEN_DHAHR_PR	11.5	11.5	Pourcent	
de GW_CPIEDMONT_OCCID_DHAHR_PR	16	16	Pourcent	

Figure 64 : Pourcentages de contributions des sources d'eaux dans la desserte d'un site de demande dans le modèle d'allocation. Cas du site « Tataouin_Urbain_SONEDE »

Source : STUDI Eau 2050

1.4.5 Assainissement urbain et rural

Les stations de traitement des eaux usées, sont schématisées par des « ***Sites de Traitement*** », à raison d'un site par gouvernorat, soit un total de vingt-quatre sites de traitement.

Les données sur les capacités des sites de traitement ont été implémentées pour la période 2002-2050. :

Liaisons hydrauliques pour les sites de traitement et les rejets des eaux usées

Il est utilisé des objets « ***Liaison de transmission*** » entre les différents sites de consommation, les sites de traitement et les milieux récepteurs (milieu naturel, réutilisation). Sur la base des hypothèses (taux de raccordement au réseau d'assainissement, taux de rejet, taux de traitement), il est estimé le pourcentage de contribution de chaque liaison/source dans l'alimentation du site de traitement. La figure 65 est un exemple de liaison du site de traitement « WT_EL_KEF» avec les différentes liaisons de transmission en

[8] Source : DGBGTH, Annuaires d'exploitation des nappes phréatique et profondes DGRE, Agridata, ONAGRI, Annuaires statistiques de la SONEDE, rapports de de DGGREE, SECADENORD, ONAS etc.

amont et en aval. Selon cette configuration, chaque liaison apportera un volume d'eau à traiter au niveau du site de traitement et des fractions de rejet par milieu récepteur (oued, réutilisation).

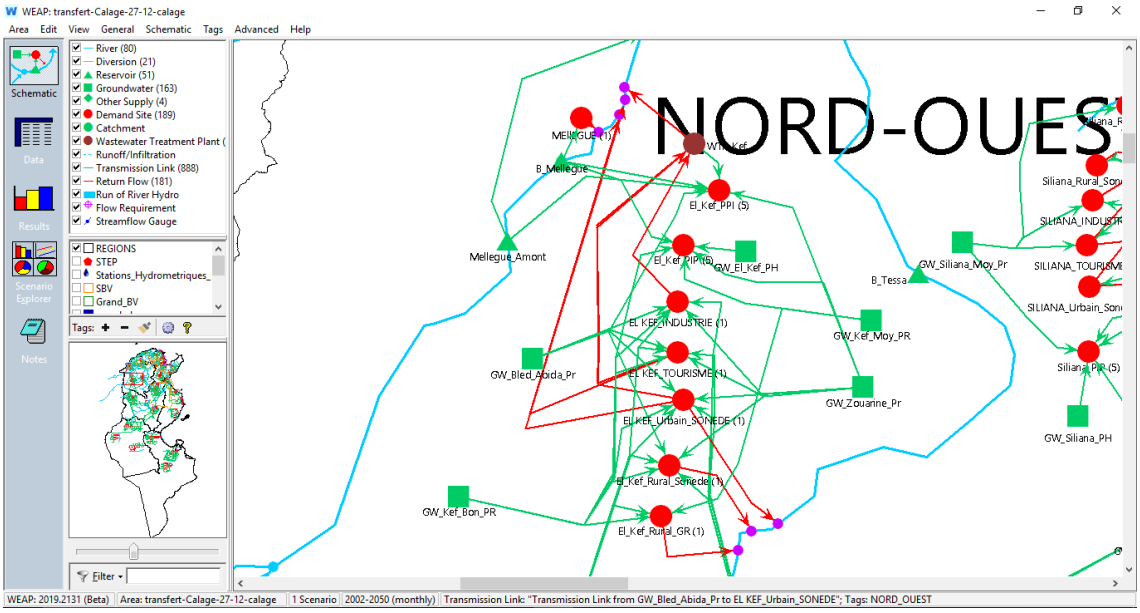


Figure 65 : *Liaisons de transmissions d'un site de traitement dans le modèle. Cas du site « WT_EL_KEF»*

Source : STUDI Eau 2050

1.4.6 Réutilisation des eaux traitées

Les secteurs d'activités potentiels pour la réutilisation des eaux traitées sont :

L'irrigation agricole ;
L'arrosage des terrains de golf ;
L'arrosage des espaces verts et tourisme ;
Le secteur industriel ;
Les usages environnementaux (recharge des nappes phréatiques et eaux écologiques)

Les données sur les volumes traités réutilisés par secteur ont été implémentées pour la période 2018-2050 :

Liaisons hydrauliques pour les sites de traitement et les sites de demande (réutilisation des eaux usées)

Il est utilisé des objets « ***Liaison de transmission*** » entre les différents sites de traitement et les sites potentiels de réutilisation pour les différents secteurs. La Figure est un exemple de liaison du site de traitement « WTP_ARIANA» avec le Périmètre irrigué « ARIANA_PPI»

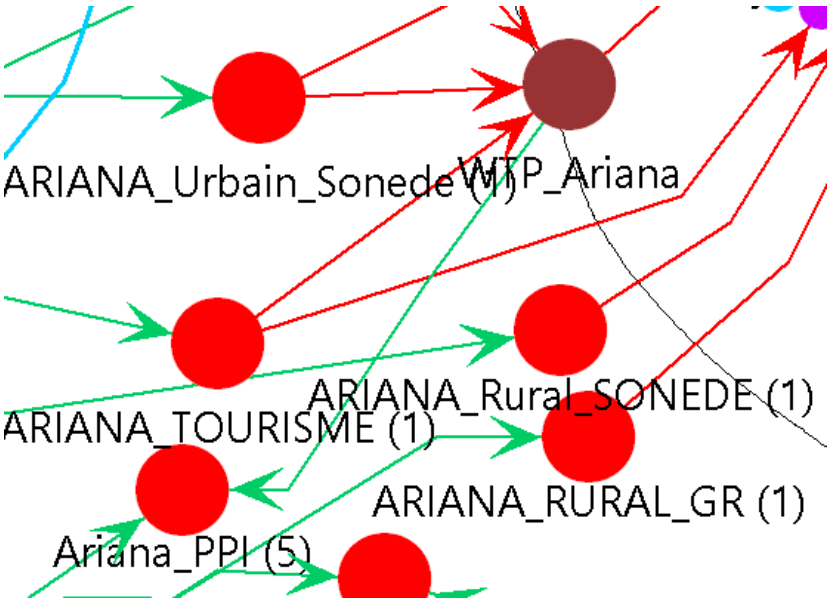


Figure 66 : *Liaisons de transmissions d'un site de demande (Périmètre irriguée) avec un site de traitement dans le modèle. Cas du site « Ariana_PPI »*

Source : STUDI Eau 2050

1.5 CALAGE ET VALIDATION DU MODELE

1.5.1 Calage du modèle

Le calage du modèle consiste à rapprocher le comportement hydraulique simulé et observé des réservoirs. Le schéma conceptuel élaboré pour chaque réservoir, les données physiques et les règles de gestion actuelles doivent être en concordance.

Avant de caler le modèle, la courbe de variation du volume simulée tend à s'éloigner de celle observée surtout pendant les mois où la demande augmente. Un calage des paramètres influents est nécessaire pour améliorer la qualité de la modélisation. Ces paramètres sont :

Des paramètres physiques du réservoir (barrage) : capacité, envasement, tranche morte, volume au début de la simulation, apport en eau mensuel et pertes par évaporation et par infiltration ;

Des paramètres liés à la gestion et à l'exploitation des réservoirs pour définir les zones de conservation, les zones tampon et la tranche morte tout en tenant compte de l'effet de l'envasement ;

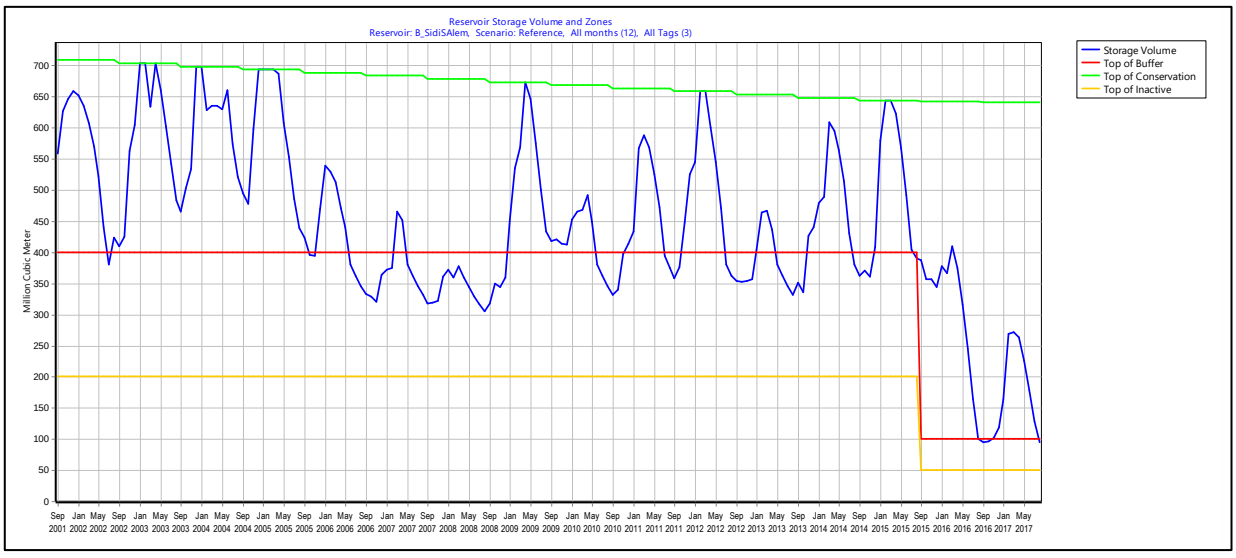


Figure 67 : Règles de gestion du barrage Sidi Salem (2002-2015)

Source : STUDI Eau 2050

L'exploitation maximale des nappes phréatiques et profondes entre les années 2002 et 2018 ainsi que les répartitions9 de cette exploitation par type d'usage, a servi, comme un paramètre de calage pour plafonner la soustraction à partir des nappes ;

Les capacités des infrastructures de transfert est identifiée comme une contrainte hydraulique supplémentaire face à la satisfaction des demandes en eau.

[9] Annuaires d'exploitation des nappes (DGRE)

Les graphiques ci-dessous présentent les volumes observés et simulés dans les barrages Bouheurtma, Sidi Salem, Sedjnene, Nebhana avant et après les opérations de calage.

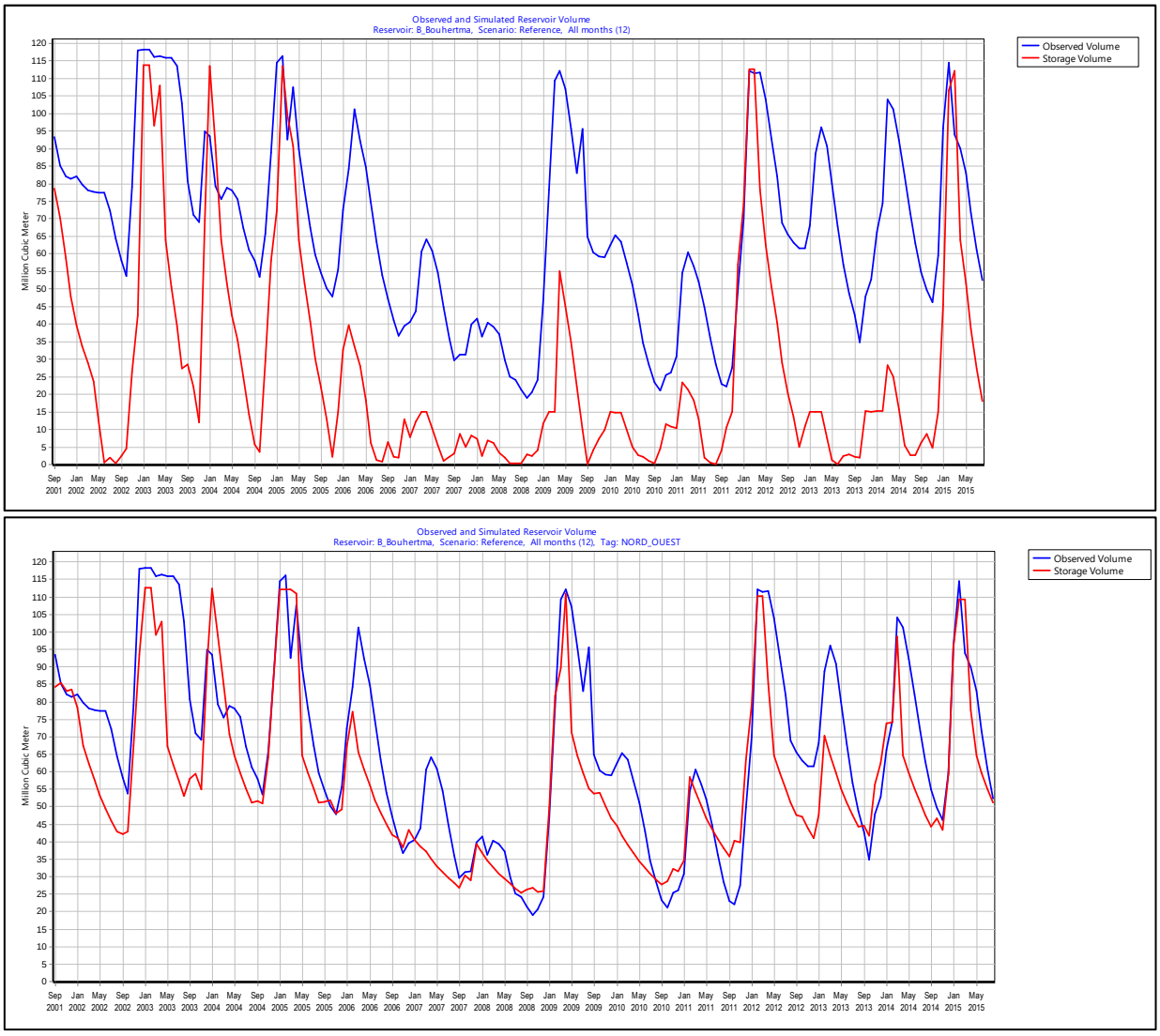


Figure 68 : Exemple de calage du barrage Bouheurtma

Source : STUDI Eau 2050

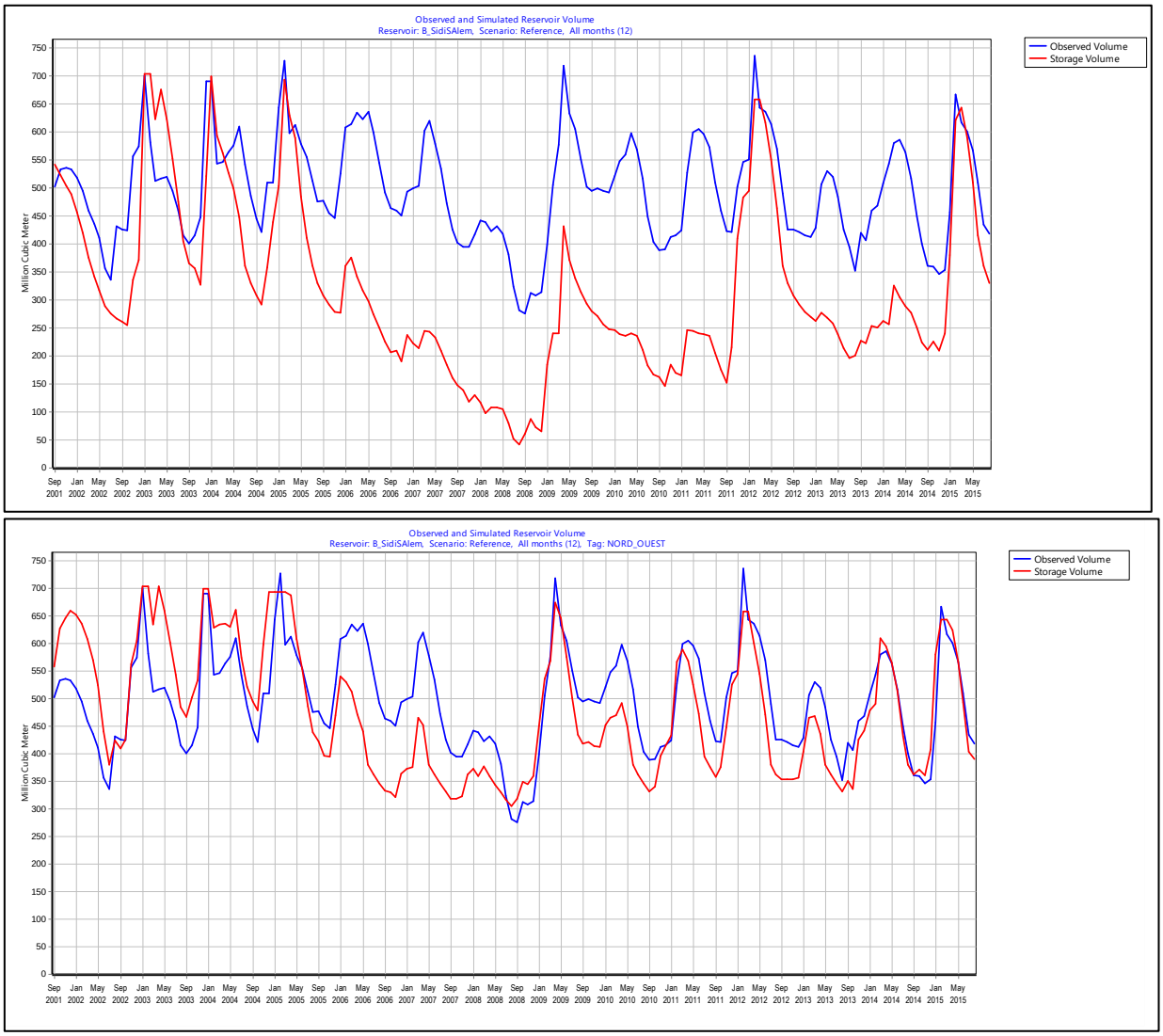


Figure 69 : Exemple de calage du barrage Sidi Salem

Source : STUDI Eau 2050

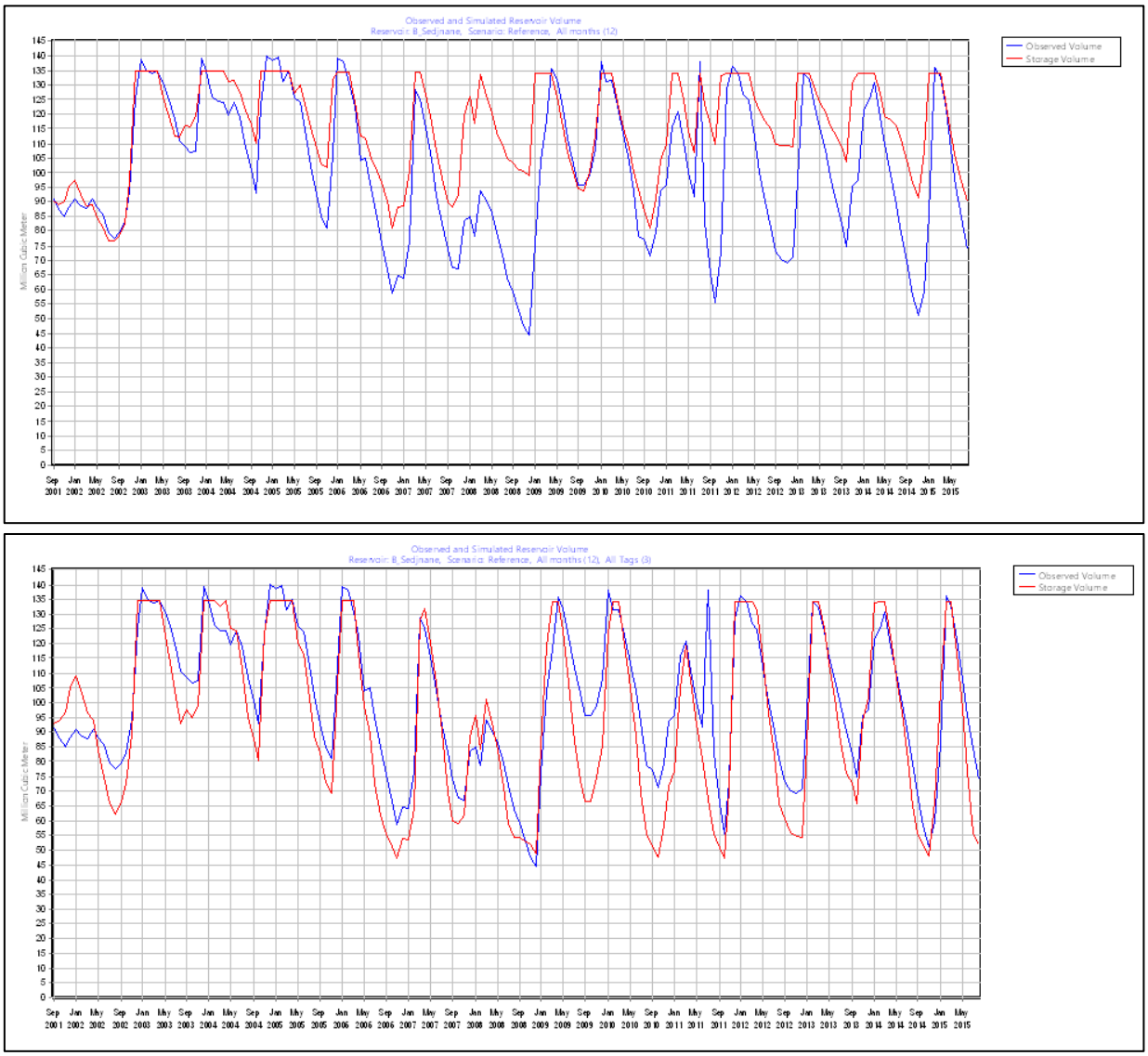


Figure 70 : Exemple de calage du barrage Sedjnene

Source : STUDI Eau 2050

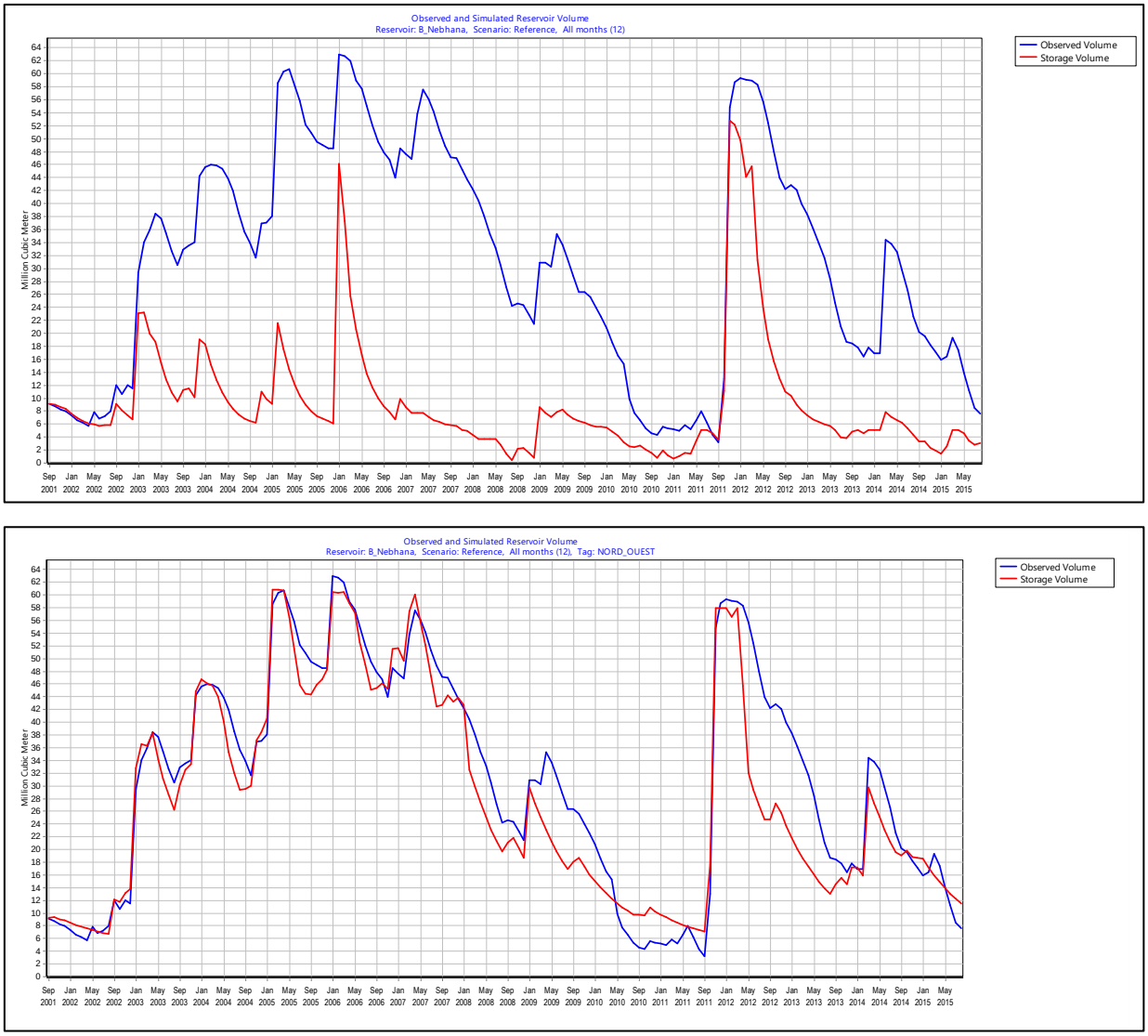


Figure 71 : Exemple de calage du barrage Nebhana

Source : STUDI Eau 2050

Les figures ci-dessous présentent les corrélations des volumes simulés et observés après le calage des barrages présentés ci-haut. Les corrélations sont globalement satisfaisantes (R2>0.6 soit R>0.77).

Le graphique de Nebhana confirme une gestion dichotomique des ressources en eau du barrage. En effet, le barrage se vide rapidement, d'une part il est très sollicité pour des besoins d'eau potable et d'irrigation non stable au fil des années et d'autre part, du fait qu'il se situe dans une zone de transition entre l'étage subhumide et le semi-aride ou les apports annuels sont très irréguliers.

Le barrage de Sidi Salem se caractérise par une forte pondération des ressources. Le barrage se trouve au cœur du système eau et présente la pièce maitresse de transfert des eaux du Nord-Ouest vers le Nord-Est et le Centre-Est. Avec la batterie des barrages en amont de la Medjerda, au verrou de sidi Salem, le système hydrologique est fortement anthropisé par la gestion amont aval de la ressource et la demande pressante des grands pôles urbain de littoral (Nord et centre).

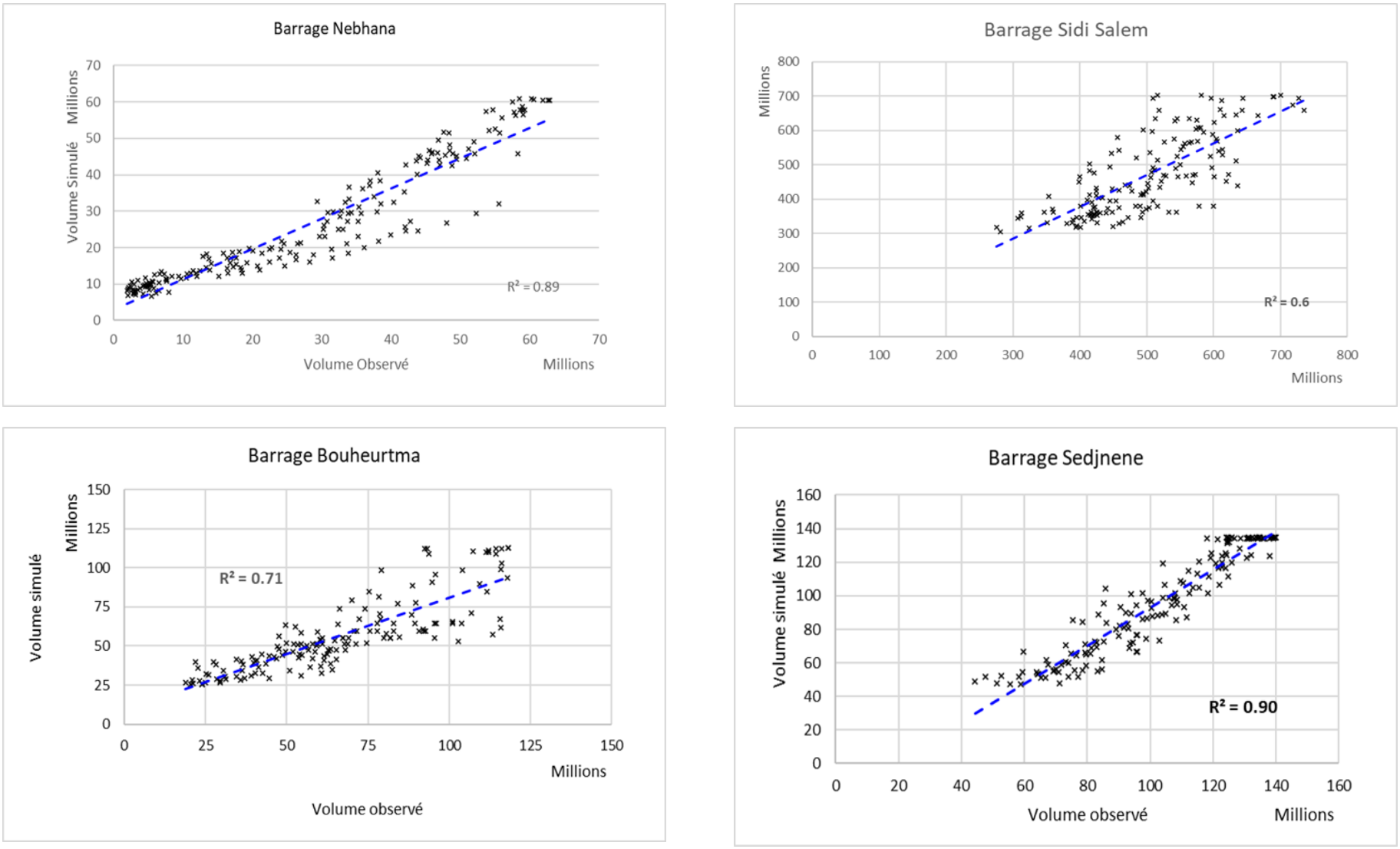


Figure 72: Corrélations des volumes simulés et observés après le calage des barrage

Source : STUDI Eau 2050

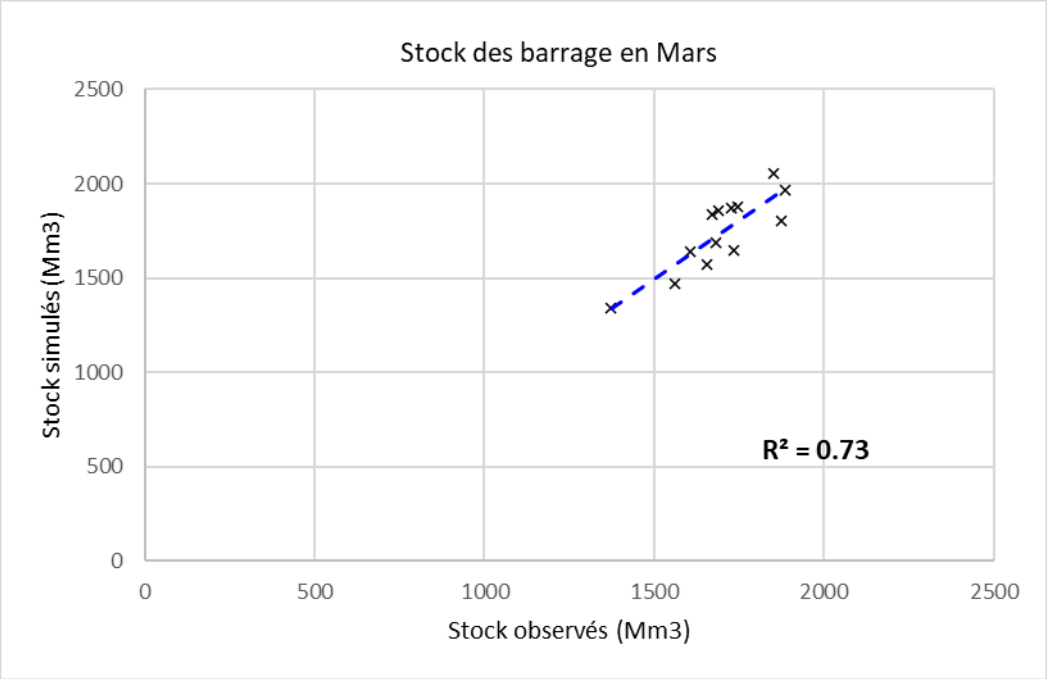


Figure 73 : Ressources en eaux de surface mobilisées observés et simulés (2002-2015)

Source : STUDI Eau 2050

1.5.2 Validation du modèle

Exemple de validation : Barrage Sidi Salem

Le bilan d'eau en chaque barrage est calculé par WEAP pour exprimer les alimentations de la retenue, les pertes et les distributions, conformément au schéma conceptuel de chaque ouvrage.

La figure suivante présente les entrées d'eau « Inflow » et les sorties « Outflow » du barrage Sidi Salem, noyau du système de mobilisation des eaux du Nord de la Tunisie. Malgré l'importance de ce barrage en capacité et en régulation, il n'en demeure pas moins que les aléas hydro-climatiques sont perceptibles avec des pertes d'eau des années humides et des déficits récurrents.

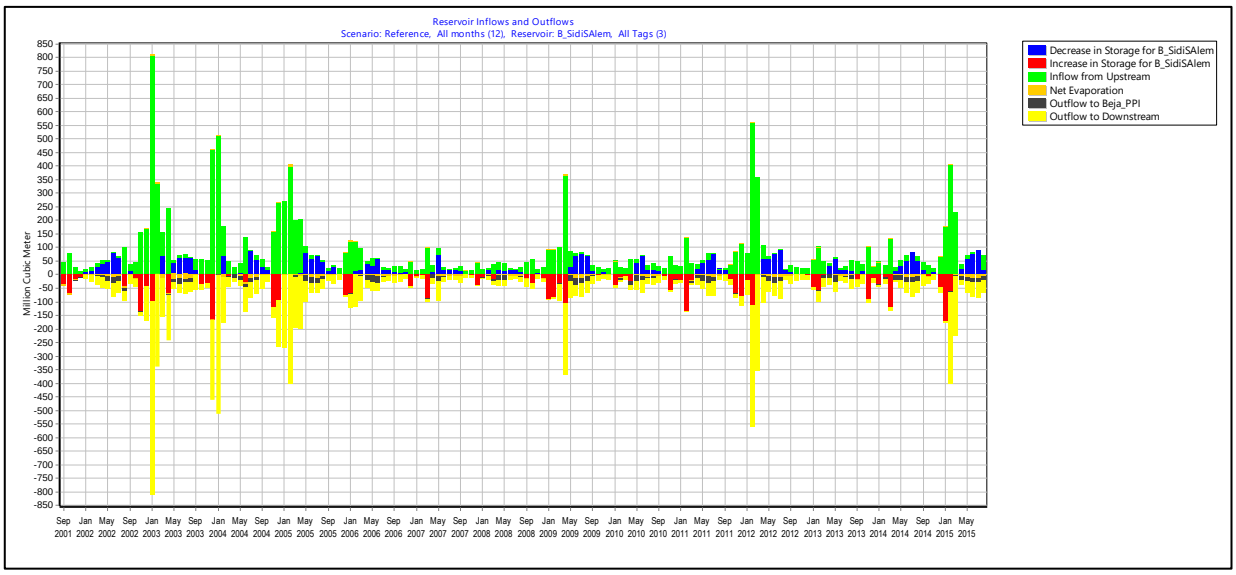


Figure 74 : Bilan mensuel du barrage Sidi Salem 2002-2015

Source : STUDI Eau 2050

Dans la figure ci-dessous la gestion coordonnée des barrages grâce à leurs interconnexions démontre la capacité de résilience du système eau de surface qui est traduit dans la figure suivante par un lissage des apports mobilisés tous barrages confondus au mois de Mars.

Cette gestion coordonnée des barrages apparait clairement dans les sorties du modèle (Figure 75)

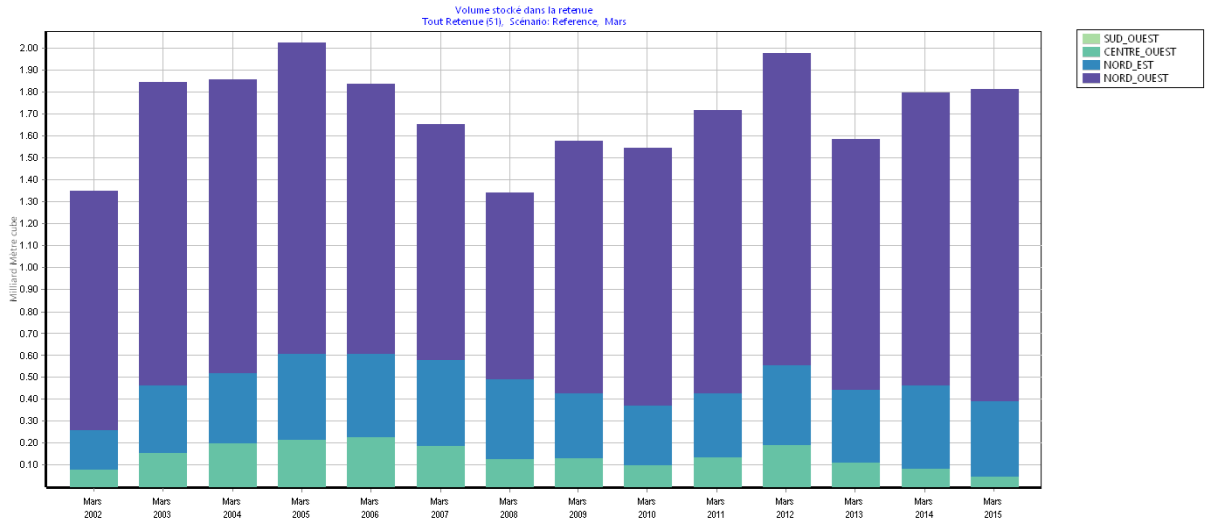


Figure 75 : Capacité de résilience par l'interconnexion des barrages et la gestion globale des eaux de surface

Source : STUDI Eau 2050

Validation des données eau potable

Le besoin en eau potable (tout usage confondu) en 2015 calculé dans le modèle est de l'ordre de 590 Mm3 ce qui est conforme avec les chiffres indiqués dans le rapport statistique de la SONEDE qui indique un volume prélevé de 670Mm3 et un volume distribué de 580Mm3 en 2015. La corrélation entre la demande en eau potable simulée dans le modèle WEAP et celle indiquée dans les rapports statistiques de la SONEDE est significative (Figure ci-dessous).

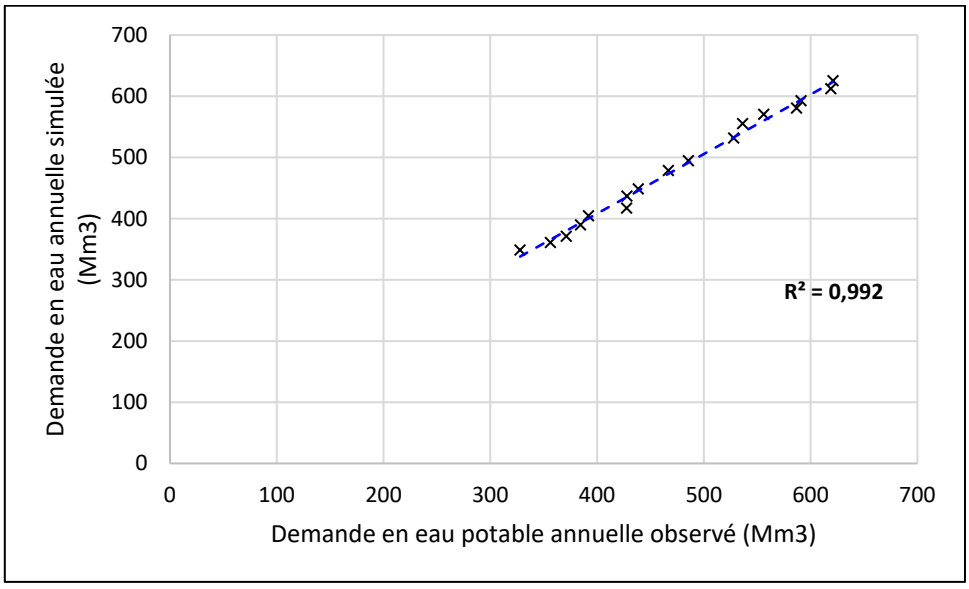


Figure 76 : Corrélation entre demande en eau annuelle observée et simulée (2002-2015)

Source : STUDI Eau 2050

La demande en eau potable est importante surtout dans les régions Nord-Est et Centre-Ouest.

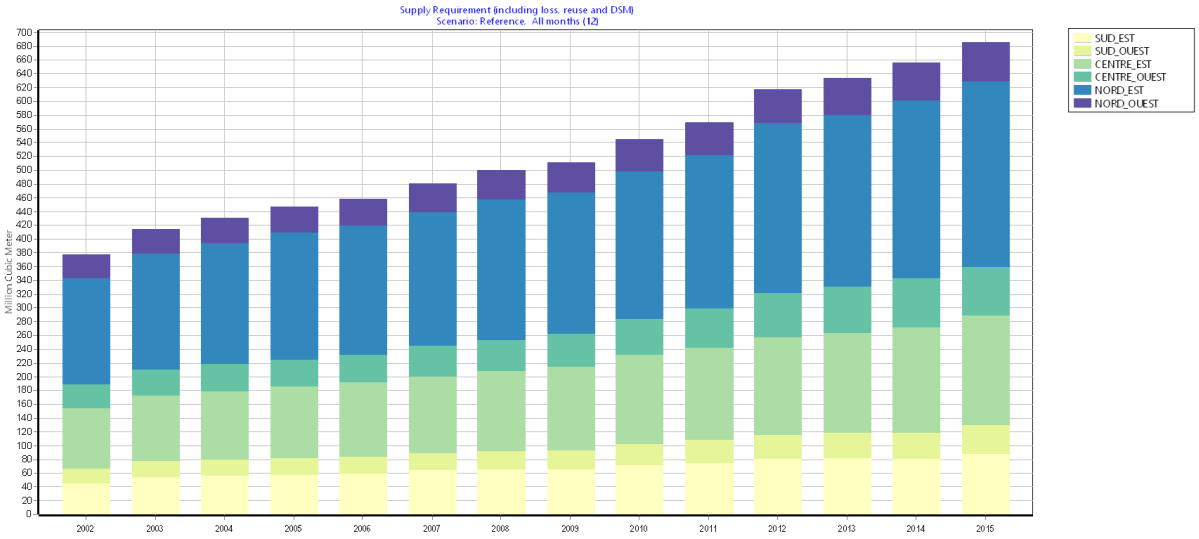


Figure 77 : Besoin en eau Potable (2002-2015)

Source : STUDI Eau 2050

Tableau 4: Besoin en eau Potable par région pour les années 2005, 2010 et 2015

Année / Régions	2005	2010	2015
NORD_OUEST	32,1	39,7	48,7
NORD_EST	161,2	187,8	234,0
CENTRE_OUEST	33,6	42,6	56,0
CENTRE_EST	93,6	116,8	139,9
SUD_OUEST	21,7	27,2	37,4
SUD_EST	42,4	52,7	70,8
Total	384,6	466,8	586,8
RS	389,9	478,8	580

Source : STUDI-EAU 2050

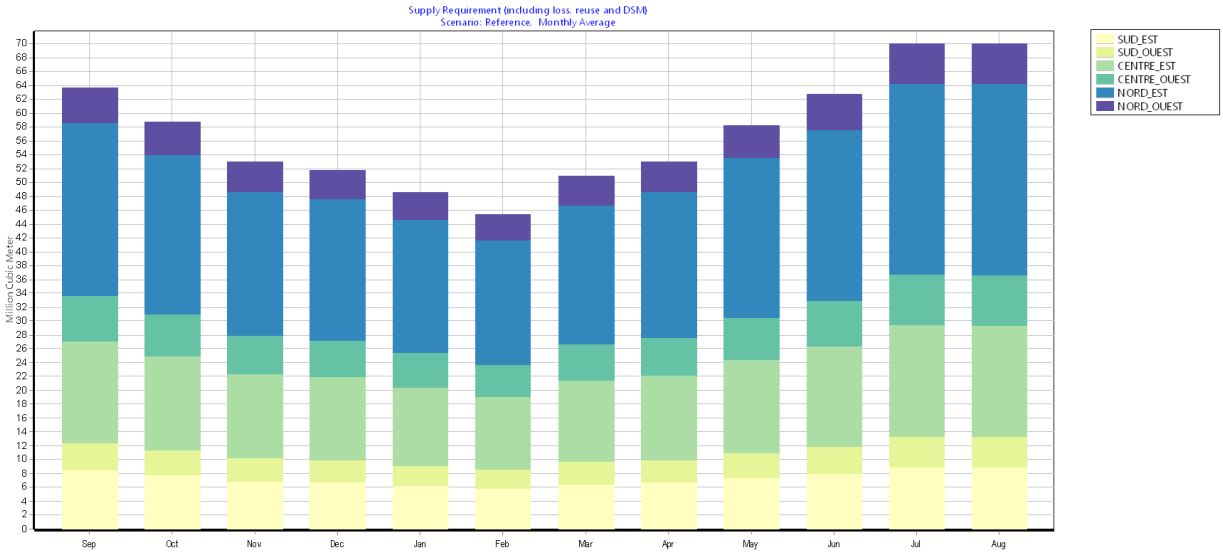


Figure 78 : Besoin EP en 2015

Source : STUDI-Eau 2050

On constate un gradient ouest-est et sud-nord dans la demande annuelle en eau potable. La variabilité est plus marquée dans le nord-est.

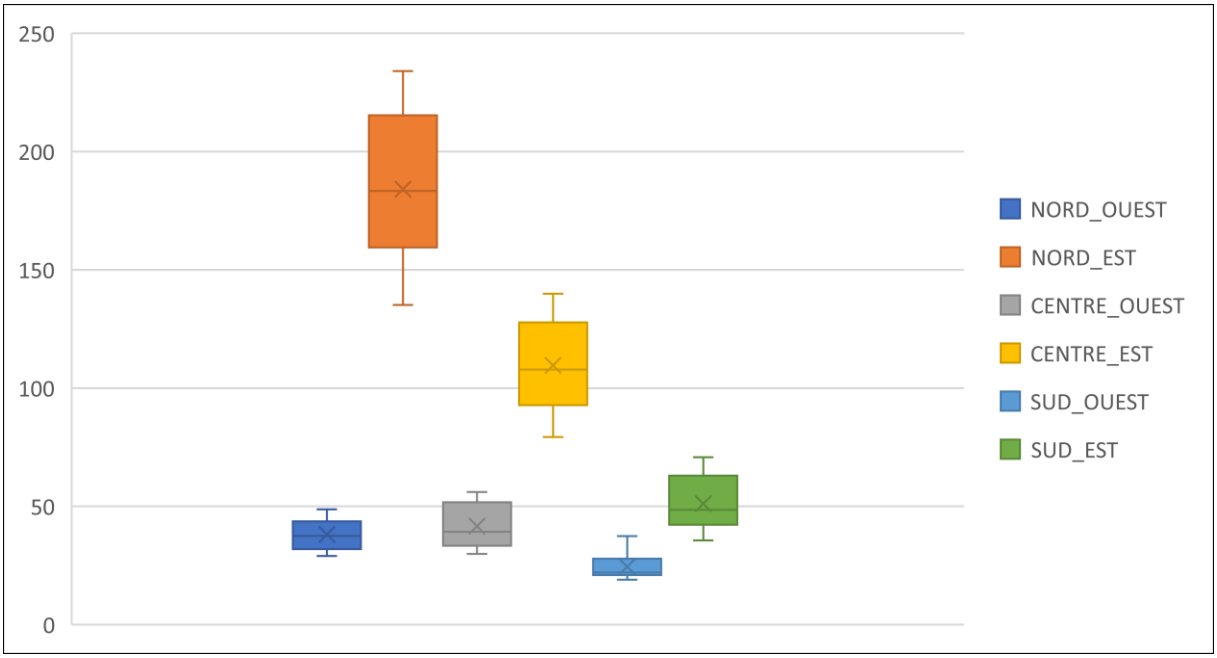


Figure 79 : Statistiques des demandes annuelles en eau potable par région (2002-2015)

Source : STUDI-Eau 2050

Consommation d'eaux dans les PPI

Sur la base des données implémentées et des algorithmes croisés (FAO et statistiques DGGREE) le modèle reproduit fidèlement les statistiques de consommation par région et pour les PPI et les PIP.

Les besoins en eau des PPI en tenant compte des pertes à la parcelle sont de l'ordre de 1 235 Mm^3 en 2015.

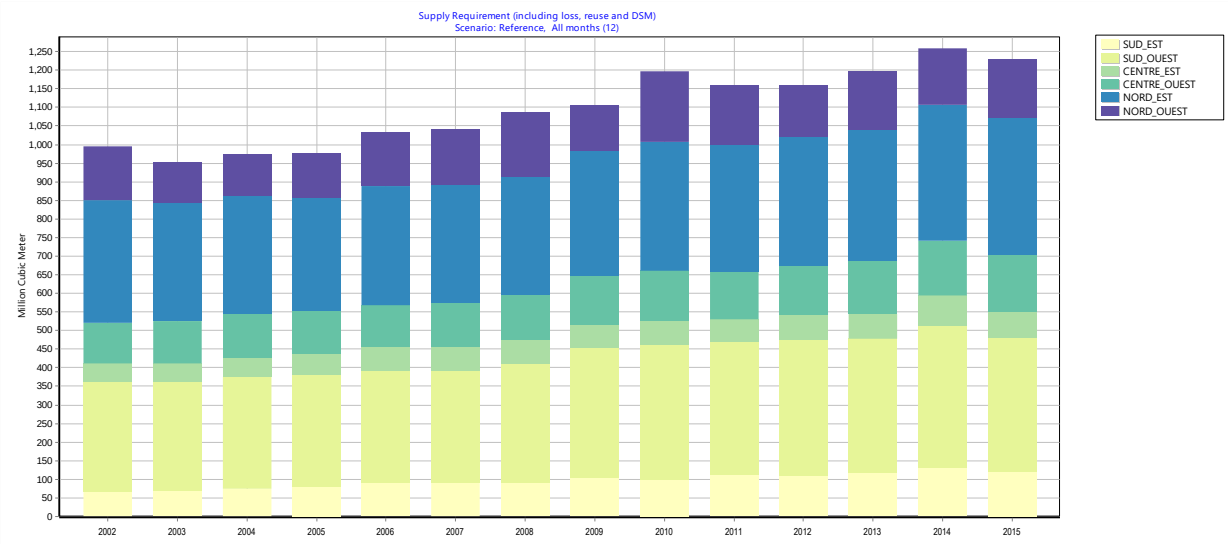


Figure 80 : Besoins en eaux des PPI

Source : STUDI Eau 2050

Tableau 5 : Les besoins en eau des PPI en 2005, 2010 et 2015 en Mm3

	PPI		
	2005	**2010**	**2015**
CENTRE_EST	57	65	70
CENTRE_OUEST	114	135	152
NORD_EST	307	345	369
NORD_OUEST	124	202	164
SUD_EST	82	98	118
SUD_OUEST	298	362	362
TOTAL	**982**	**1208**	**1235**

Source : STUDI-Eau 2050

Consommation d'eau dans les PIP

Les besoins en eau des PIP en tenant compte des pertes à la parcelle sont de l'ordre de 1 329 Mm^3 en 2015.

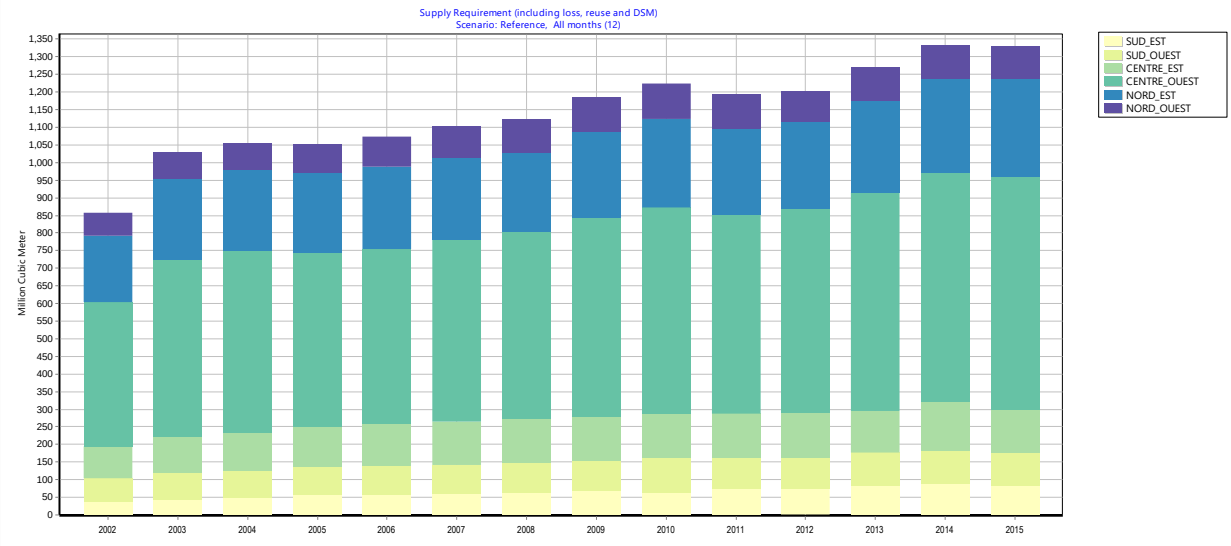


Figure 81 : Besoins en eaux des PIP

Source : STUDI Eau 2050

Tableau 6 : Les besoins en eau des PIP en 2005, 2010 et 2015 en m3

	PIP		
	2005	**2010**	**2015**
CENTRE_EST	114	126	121
CENTRE_OUEST	495	586	663
NORD_EST	226	250	275
NORD_OUEST	81	100	94
SUD_EST	54	63	81
SUD_OUEST	81	97	95
TOTAL	**1 051**	**1 222**	**1 329**

Source : STUDI-Eau 2050

2 CHAPITRE 2 : SIMULATIONS DU MODELE PAR THEME DES TDRs

2.1 LES EAUX DE SURFACE

2.1.1 Modélisation dynamique du système eaux de surface

L'objectif de ce chapitre est de projeter les tendances climatiques aux horizons de l'étude et en adéquation avec les termes de référence ; nous étalerons les projections aux horizons 2025, 2030, 2040 et 2050.

Les statistiques du système eau de la Tunisie révèlent un certain nombre d'éléments caractéristiques de l'hydrologie :

Une ressource en eau rare ;

Une ressource en eau très irrégulière ;

Une ressource en eau inégalement répartie dans l'espace ;

Une dissymétrie des apports annuels en eau. L'année normale (apport moyen) s'observe une année sur trois au nord, une année sur huit au centre et une année sur dix au sud.

Une qualité de l'eau assez médiocre dans plusieurs régions ;

Une dynamique érosive forte et une sédimentation rapide des barrages et retenues collinaires ;

Une efficience des réseaux de moins en moins performante ;

Une demande en eau de plus en plus en hausse du fait de l'accroissement démo-économique ;

Une tendance à l'extension des superficies irriguées en dépit de la rareté des ressources ;

Des défis climatiques à venir.

De ce fait la modélisation a été conçue et développée de façon dynamique. Il est bien entendu que mis à part le réchauffement climatique, des éléments de forçages sont prévisibles : climatique, hydrologique, sédimentologique, limnologique, démographique.

Le système eau est également sensible aux sollicitations du modèle par les utilisateurs et gestionnaires à savoir : (i) sollicitations des rendements des réseaux et circuits hydrauliques, (ii) des besoins et des demandes et consommations en eau, (iii) des superficies irriguées annuellement, (iiii) des besoins écologiques.

2.1.2 Forçages

Le système eau est directement influencé par certains facteurs qui lui sont externes et que l'on désigne sous le terme de forçages. On distingue des forçages naturels (changements climatiques, sédimentation des barrages, etc.) et des forçages anthropiques causés essentiellement par l'Homme (pollutions, érosions, dégradations, etc.).

2.1.2.1 Les forçages climatiques

Dans le cadre de la 21ème conférence des Parties (COP21) organisée à Paris en 2015, les Parties à la CCNUCC sont parvenues à un accord pour lutter contre le changement climatique et pour accélérer et intensifier les actions et les investissements nécessaires à un avenir durable à faible intensité de carbone. L'objectif central de l'Accord de Paris est de limiter l'augmentation de la température à 1,5 degré Celsius à l'horizon 2100. En outre, l'accord vise à accroître la capacité des pays à faire face aux impacts du

changement climatique et à rendre les flux financiers compatibles avec un faible niveau d'émissions de GES et une voie résiliente au climat[10].

Dans leurs cinquième rapport AR5, le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) a défini quatre trajectoires d'émission et de concentration de gaz à effet de serre (GES), d'ozone et d'aérosols, ainsi que d'occupation des sols baptisés RCP (« Representative Concentration Pathways » ou « Profils représentatifs d'évolution de concentration »). Les quatre profils RCP correspondent chacun à une évolution différente de forçage radiatif à l'horizon 2300 (Figure ci-après).

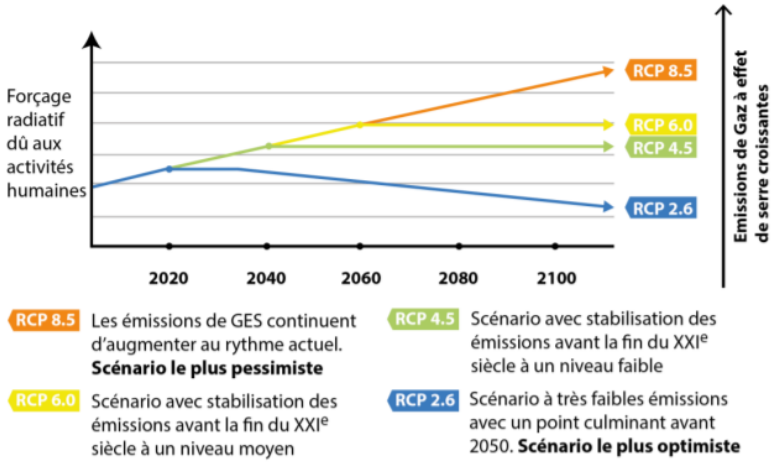


Figure 82 : Scénarios d'évolution du climat (Representative Concentration Pathways RCP)

Source : Météo France

Les projections réalisées sur la base de tous les scénarios d'émissions considérés indiquent une augmentation de la température de surface au cours du XXIème siècle. Il est très probable que la fréquence et la durée des vagues de chaleur augmenteront et que les précipitations extrêmes vont devenir plus intenses et plus fréquentes dans de nombreuses régions. Les océans vont continuer de se réchauffer et de s'acidifier et le niveau moyen de la mer de s'élever[11].

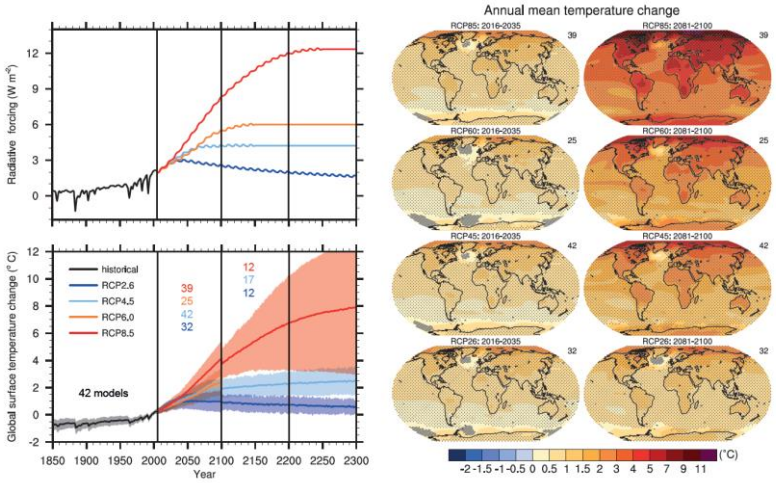


Figure 83 : Forçages radiatifs, anomalies des températures moyennes annuelles et projections 2030 et 2100 des quatre scénarios RCP12.

Source :*GIEC,*AR5

[10] www.unfcc.int

[11] GIEC, 2014 : Changements climatiques 2014: Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer]. GIEC, Genève, Suisse, 161 p.

[12] IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

Selon le GIEC, la hausse des températures, à l'échelle du globe, serait alors comprise entre 1.4°C et 2.6°C en 2050 et entre 2.6°C et 4.8°C en 2100[13].

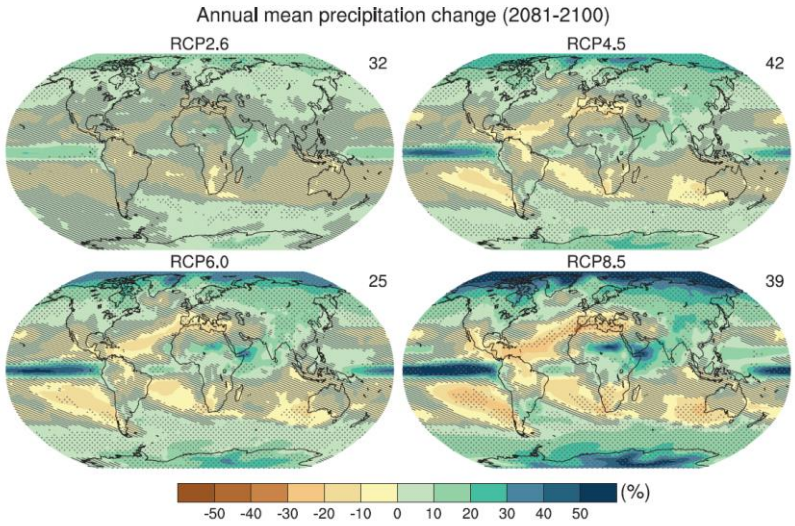


Figure 84 : Projection des anomalies des précipitations pour les quatre scénarios RCP à l'horizon 2100
Source : (IPCC,2013)

Le GIEC identifie le bassin Méditerranéen comme une zone particulièrement exposée aux changements climatiques, un des 25 « hot spots » au niveau mondial.

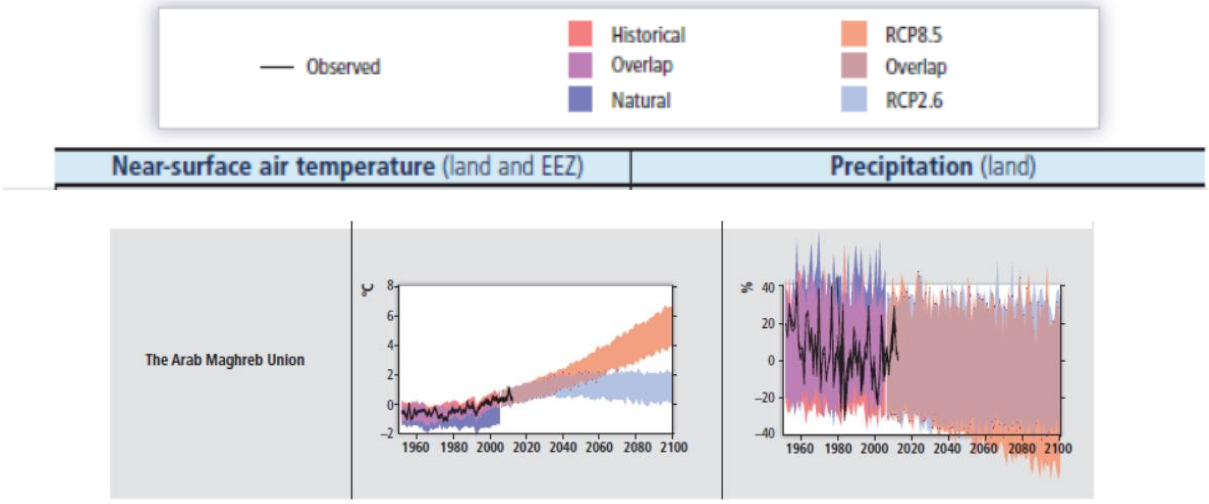


Figure 85 : tendance et projection des Températures et précipitations14

Source : IPCC, 2014

[13] IPCC (2013), Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

[14] IPCC, 2014: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 688.

En Tunisie, l'INM est l'institution chargée de l'étude du climat et de l'évaluation du climat futur à la base des scénarios du Projet EURO-CORDEX.

Les horizons retenus sont 2050 et 2100 pour faciliter la comparaison avec les projections internationales et s'aligner avec les études réalisées. La durée des tranches climatiques analysées a été fixée à 30 ans:

1981-2010 pour la période de référence ;

2036-2064 pour le moyen terme (2050) ;

2071-2100 pour le long-terme (2100).

La base de données des variables climatiques (précipitations, températures moyennes, températures maximales, températures minimales, évaporation, etc.) spatialisée sur tous le territoire tunisien et validée lors de l'étape 2 du diagnostic servira comme données représentatives de la période de référence. Les cartes de projection de l'INM sont numérisées à l'aide d'un outil SIG. L'information est ainsi agrégée à l'échelle régionale et par étage bioclimatique.

Les projections climatiques pour la Tunisie ont été construites sur la base : (i) du dernier rapport du GIEC, (ii) de la troisième communication nationale sur les changements climatiques et (iii) des rapports thématiques des études menées au sein du MARHPM. Les forçages climatiques retenus correspondent aux scénarios climatiques RCP 4.5 et le RCP 8.5. L'approche adoptée par l'INM se base sur le croisement des sorties de 14 modèles climatiques régionaux (MCR)[15].

Le scénario RCP4.5 correspond à un effort international soutenu de réduction des gaz à effets de serre alors que le RCP8.5 correspond à un scénario « sans politique » qui s'avère aujourd'hui le plus probable au regard du dernier rapport du GIEC et de l'absence de baisse des émissions au niveau mondial. Le RCP 8.5 est considéré comme le scénario de l'inaction.

Les projections se basent sur les travaux validés et réalisés dans le cadre du plan national d'adaptation[16] (PNA).

Pour cette étude, la base de données EURO-CORDEX est retenue du fait qu'elle offre pour la Tunisie le plus grand nombre de simulations et une meilleure résolution spatiale (12 km).

Figure 86 : Domaine de l'Euro-CORDEX[17]

L'approche se base sur :

Une correction des biais des projections des modèles Euro-Cordex pour les précipitations en recalant l'écart entre les variables climatiques du modèle et celles de référence pour la période historique. Cette étape est indispensable pour corriger les projections des scénarios ;

[15] https://www.meteo.tn/fr/changement-climatique

[16] ACTERRA, GRET, SUEZ (2020) : Analyse des effets des scénarios de changement climatique RCP 4.5 et RCP 8.5. Adap'Action, Tunisie-Contribution aux éléments de la phase préparatoire du processus du plan national d'adaptation (Axe 2).

[17] https://euro-cordex.net/

Une désagrégation spatiale ou dite aussi descente d'échelle permet de désagréger les projections climatiques à une échelle plus fine. La résolution de l'Euro-CORDEX est de 12 Km. Une approche statistique permet d'avoir des projections à une échelle plus fine (exemple dans l'étude PNA, 5km).

Pour les projections des précipitations et de l'évolution des températures les travaux de l'INM ont été pris pour référence, illustrés par les cartes suivantes :

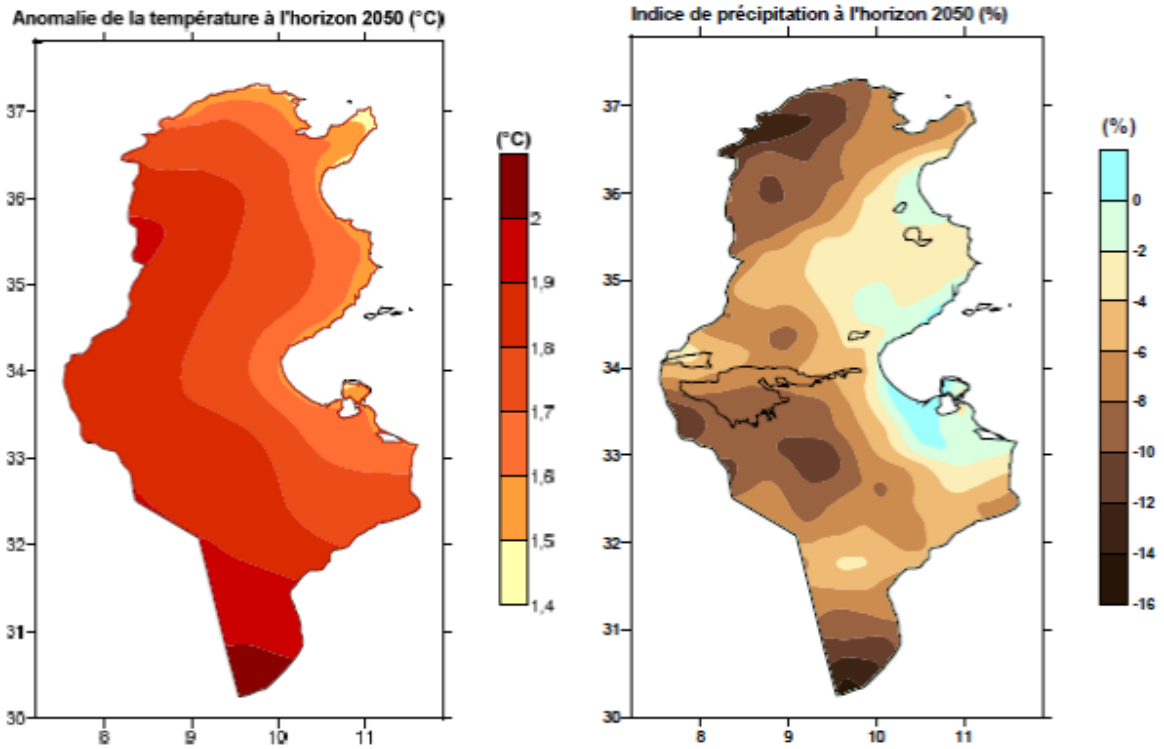


Figure 87 : Anomalie de température (A gauche) et Indice de précipitation (A droite) à l'horizon 2015
Source : INM

Précipitations

La cartographie réalisée dans le cadre de l'étude Eau 2050 illustre les précipitations projetées en 2050 et 2100 par étage bioclimatique sur la base de l'évolution de la moyenne annuelle de précipitation par rapport à la période de référence 1981-2010.

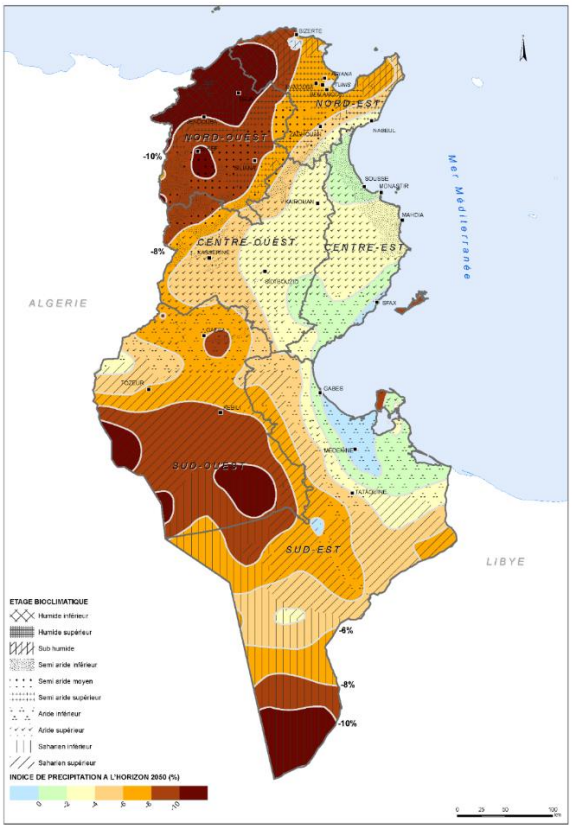


Figure 88 : Projection des anomalies de précipitation à l'horizon 2050

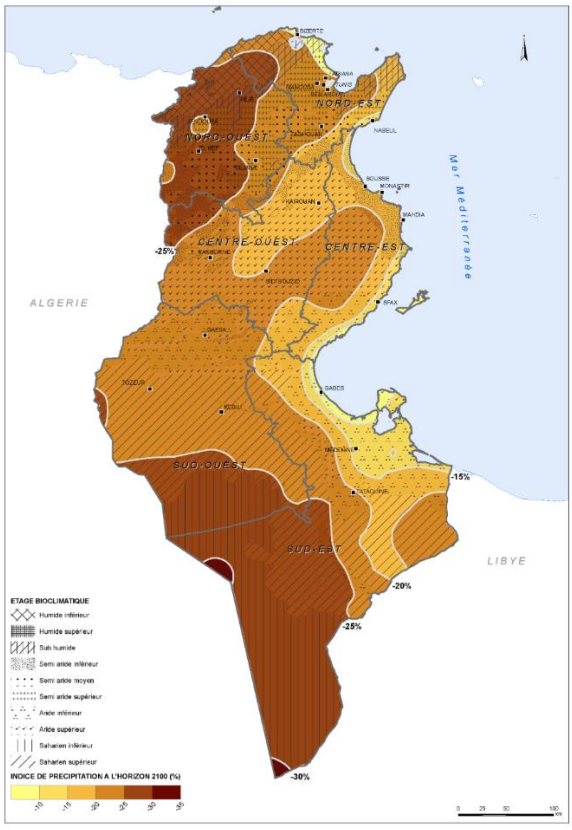


Figure 89 : Projection des anomalies de précipitation à l'horizon 2100

Source : INM traitement STUDI

Les tendances à la baisse sont significatives sur la période 1981-2100 pour l'ensemble des étages bioclimatiques et pour les 2 scénarios RCPs. Les projections prévoient une réduction des précipitations qui varie entre 14mm et 22mm en 2050 (soit entre 6% et 9% de la valeur de référence) et entre 23mm et 45mm en 2100 (soit entre 9% et 18%) par rapport à la période de référence.

Températures

Cette tendance est également observée pour les températures minimales et maximales moyennes annuelles. Sur la période 1950-2010, l'étude de l'évolution de la température moyenne annuelle en Tunisie, a porté sur les stations représentatives du réseau d'observation de l'INM. Toutes les séries ont présenté une tendance à la hausse de la température moyenne annuelle. Les maximums de température sont observés dans les zones les plus continentales (dans le Sud et à l'Ouest). Cette hausse de température moyenne est observée surtout pendant l'été et au printemps**Erreur ! Signet non défini.**.

Figure 90 : tendances des températures moyennes, minimales et maximales annuelles entre 1950 et 2010

Source : INM

Les cartes suivantes réalisées dans le cadre de l'étude Eau 2050, présentent l'évolution de la moyenne annuelle de température par rapport à la période de référence 1981-2010 et pour les deux périodes 2050 et 2100.

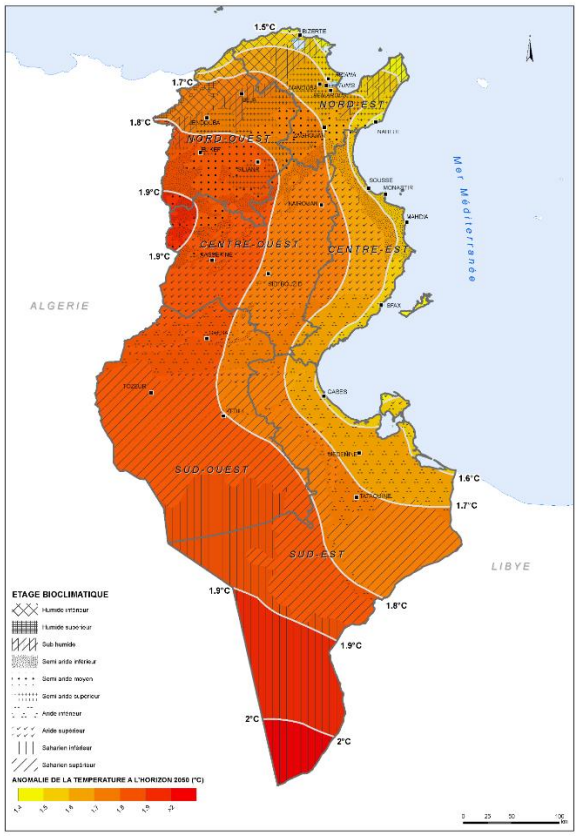


Figure 91 : Projection des anomalies des températures à l'horizon 2050 (INM)

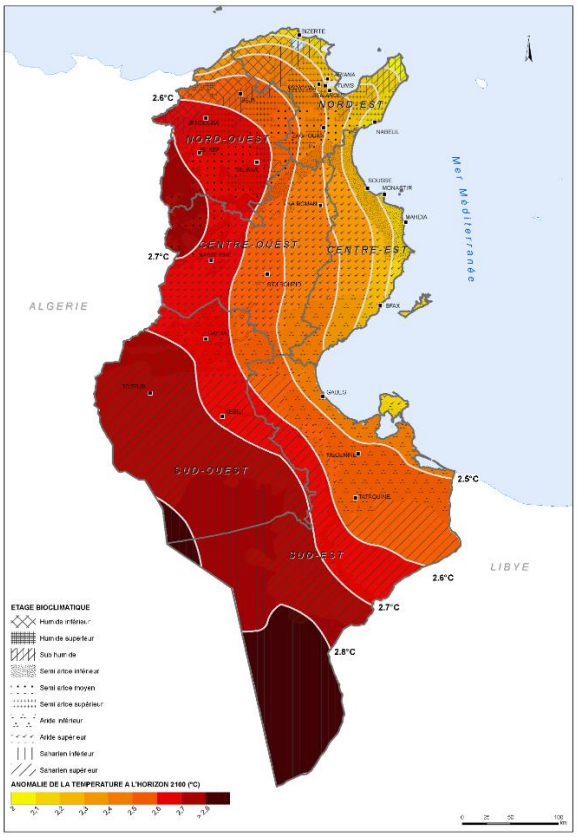


Figure 92 : Projection des anomalies des températures à l'horizon 2100 (INM)

On observe une augmentation globale des températures. La mer a un effet régulateur sur la répartition spatiale des températures moyennes qui se traduit par un réchauffement moins intense des bordures littorales de la Tunisie par rapport au réchauffement des régions continentales. Des évolutions très similaires sont prévues par les modèles globaux concernant les températures minimales et maximales.

Tableau 7 : Synthèse des évolutions des variables climatiques[18]

Variables climatiques	Evolution actuelle	Commentaires	Evolution attendue	Commentaires	Concordance des modèles
Cumul de précipitation	Augmentation Faible	Tendance non significative	Diminution moyenne	-14 à -22 mm en 2050 -23 à -45 mm en 2100	Forte
Température minimale	Augmentation Forte	+0.32 °C/décennie	Augmentation Forte	+1.5 à 1.9 °C en 2050 +1.9 à 3.9 °C en 2100	Forte
Température moyenne	Augmentation Forte	+0.37 °C/décennie	Augmentation Forte	+1.6 à 1.9 °C en 2050 +2.0 à 3.9 °C en 2100	Forte
Température maximale	Augmentation Forte	+0.44 °C/décennie	Augmentation Forte	+1.7 à 1.9 °C en 2050 +2.1 à 3.9 °C en 2100	Forte

Source : STUDI-EAU 2050

[18] Contribution aux éléments de la phase préparatoire du processus du Plan National d'Adaptation - Axe 2- Analyse des effets des scénarios de changement climatique RCP 4.5 et RCP 8.5 (2020)

Autres indicateurs / variables climatiques[19,20]

Les autres indicateurs clés des variations climatiques sont résumés dans le tableau ci-après :

Tableau 8 : Autres indicateurs climatiques clés

Indicateurs agro climatiques	Valeur moyenne observée pour la Tunisie sur la période de référence	Scénario	Delta moyen par rapport à la période de référence[21]		Taux de variation par décennie		
			2050	2100	Tunisie	Saharien	Aride
Bilan hydrique (mm)	-94	RCP4.5	-40.7	-48.3	-5.2	-4.4	-4.8
		RCP8.5	-41.4	-89.0	-9.9	-8.7	-9.2
Évapotranspiration potentielle (mm)	564	RCP4.5	40.5	52.7	5.8	6.4	5.6
		RCP8.5	50.8	102.6	11.3	12.2	11.0
Indice de répartition pluviométrique	Très variable	RCP4.5	-0.7	-0.8	-0.09	-0.04	-0.1
		RCP8.5	-0.6	-1.2	-0.2	-0.07	-0.2
Nombre de jours entre 2 pluies efficaces (jours)	>25 dans les territoires d'intérêts pour les parcours	RCP4.5	0.6	0.3	0.03	-	0.007
		RCP8.5	0.4	1.2	0.01	-	-0.1
Nombre de jours de gel par an (jours)	4.2	RCP4.5	-2.8	-3.5	-0.3	-0.2	-0.3
		RCP8.5	-4.0	-5.7	-0.4	-0.3	-0.4
Nombre de jours de gel fort par an (jours)	0.03	RCP4.5	-0.03	-0.05	-0,001	-7.00E-06	-7.00E-04
		RCP8.5	-0.05	-0.06	-0,001	-5.00E-06	-5.00E-04
Nombre de jours de gel printanier (jours)	1.3	RCP4.5	-0.9	-1.0	-0.08	-0.02	-0.06
		RCP8.5	-1.2	-1 .7[22]	-0.1	-0.03	-0.1
Nombre de jours échaudants (jours)	62	RCP4.5	6.7	8.4	1.1	0.8	1.2
		RCP8.5	7.4	13.5	1.8	1.1	1.9
Nombre de jours de chaleur extrême (jours)	14	RCP4.5	11.9	15.5	1.7	2.5	1.5
		RCP8.5	15.4	29.6	3.4	4.6	3.2

La figure ci-après montre l'implémentation des scénarii climatiques dans le modèle. Les cartes numérisées des étages bioclimatiques croisés avec les forçages climatiques (précipitations et températures) sont implémentées dans le modèle. Ces cartes sont donc lues par l'algorithme FAO 56 pour ajuster les besoins en eaux par étage bioclimatique et par spéculation agricole irriguée.

[19] INM, 2017 : Etude des tendances et des projections climatiques en Tunisie.
[20] ACTERRA, GRET, SUEZ (2020) : Analyse des effets des scénarios de changement climatique RCP 4.5 et RCP 8.5. Adap'Action, Tunisie-Contribution aux éléments de la phase préparatoire du processus du plan national d'adaptation (Axe 2).
[21] Le delta correspond à la différence entre les valeurs modélisées pour les périodes futures et pour la période de référence.
[22] Le delta étant calculé sur les valeurs modélisées en périodes future et de référence, il peut dans certains cas dépasser la valeur observée, en valeur absolue.

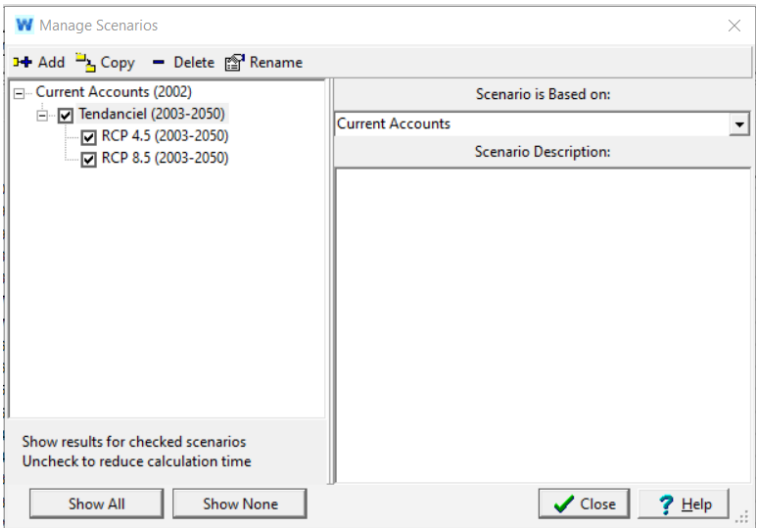


Figure 93 : Montage des forçages climatiques sur le modèle

Source : STUDI Eau 2050

2.1.2.2 Les forçages hydrologiques

Dans le cadre de la préparation de la troisième communication sur les changements climatiques, l'INM prévoit un déplacement vers le Nord des zones bioclimatiques[23] d'environ 100 à 150 km. On considère une « remontée des étages bioclimatiques » et de l'aridité vers le nord. Notons une élévation plus importante en situations extrêmes. Sur le plan hydrologique, les baisses des précipitations seront probablement accentuées dans les bilans « pluie-débit » par bassin versant.

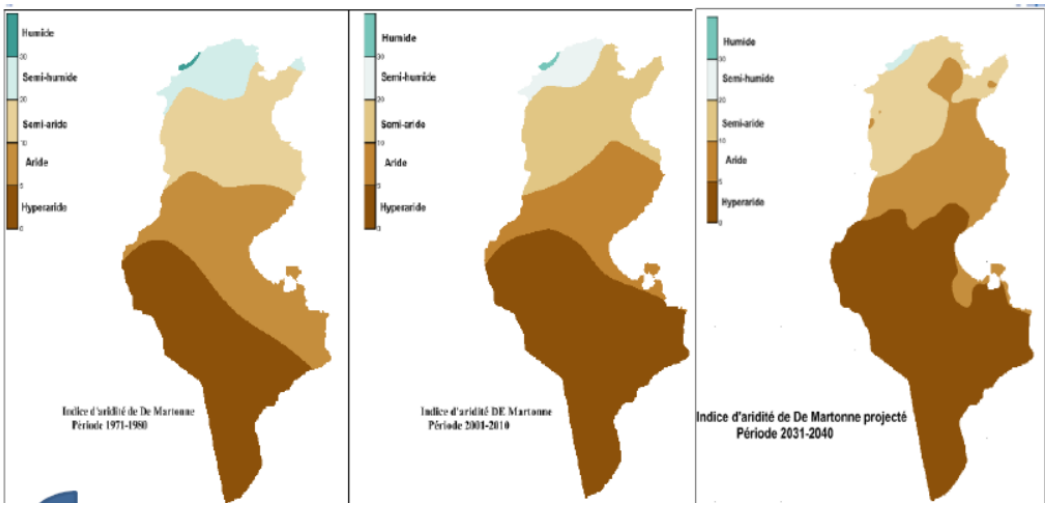


Figure 94 : Remontée des étages bioclimatiques entre 1971 et 2040

Source : INM

Les phénomènes extrêmes comme les inondations et les sécheresses deviendraient plus fréquents comme le résultat d'un climat plus chaud[24], et le GIEC va jusqu'à prévoir la migration du désert plus au nord.

Ces éléments corroborent l'hypothèse de translation du climat dominant plus au sud vers plus au nord du pays. A cet effet, on observe que les températures moyennes spatiales des trois régions géographiques (nord, centre et sud), et les écarts entre les régions, sont de l'ordre de l'augmentation des températures prévues par les changements climatiques.

[23] INM, 2017 : Etude des tendances et des projections climatiques en Tunisie. Hayhtem Belghrissi.

[24] TABET-AOUL MAHI (1999) : Changement climatique et risque. Ministère de l'urbanisme, de l'habitat et de l'environnement.

Cette hypothèse de translation climatique sud-nord pourrait donc être retenue. L'avantage, c'est de s'appuyer sur des observations hydrologiques connues pour le nord, le centre et pour le sud du pays.

Sur un autre plan, une baisse des précipitations se traduit par une amplification de la baisse du ruissellement. Ce constat est corroboré par la comparaison des déficits hydrologiques par rapport aux déficits pluviométriques observés en Tunisie en année sèche. A titre d'exemple, pour les années sèches suivantes enregistrées en Tunisie, les déficits pluviométriques et hydrologiques sont respectivement comme suit :

Tableau 9 : Déficits pluviométriques et hydrologiques pour quelques années sèches en Tunisie

Année hydrologique	Déficit pluviométrique	Déficit hydrologique
1985-1986	24%	50%
1987-1988	44%	70%
1994-1995	24%	43%
2000-2001	33%	58%

Source : DGRE, traitement STUDI

Un certain nombre de références bibliographiques corroborent ces tendances de projections hydro-climatiques (amplifications hydrologiques des déficits pluviométriques) dans un contexte de changements climatiques, notamment en Afrique du Nord et subsaharienne.

En Algérie, l'oued Cheliff est le principal cours d'eau (apport annuel moyen : 1,2 milliard m^3/an). Son déficit pluviométrique durant les sécheresses de l'ouest algérien des années quatre-vingt (~25%) s'est traduit par un déficit d'écoulement plus amplifié (-50%)[25]. Plus sévèrement, les travaux de Laborde & al.[26], sur le nord de l'Algérie concluent que «*15% de baisse de la pluviométrie se traduirait par une baisse de 40% des écoulements de surface*».

Partant de cette analyse sous différents climats environnants de la Tunisie, on constate en moyenne, un écart sensiblement double des écoulements par rapport aux écarts des précipitations.

On peut donc a priori considérer le rapport des déficits pluviométriques et hydrologiques est en moyenne « un pour deux », et plus sévèrement, si les années sont plus sèches ou plus humides.

Afin de traduire les phénomènes de changement hydrologiques décrits ci-haut en termes quantiliques, la statistique hydrologique des écoulements au nord, centre et au sud de la Tunisie est établie comme suit : les apports annuels sont ajustés à une loi de distribution (la loi Log-normale est le modèle de distribution adapté lorsque les apports annuels sont fortement dissymétriques, avec une fréquence plus grande des années sèches par rapport aux années pluvieuses). L'ajustement de la loi de Log-normale permet d'établir ci-dessous la statistique des apports en années sèches et pluvieuses :

[25] MEDDI M. et HUBERT P. (2003) - Impact de la modification du régime pluviométrique sur les ressources en eau du Nord-Ouest de l'Algérie. In : Hydrology of the mediterranean and semiarid regions, IAHS publication, n°278, p. 229-235.
[26] LABORDE JP., ASSABA M., DEMAK A., BEHLOULI L. (2008) – La ressource en eau de surface de l'Algérie du nord : que se passerait-il si la pluviométrie baissait ? Note ANRH/AIC. 2008. 8 pages.

Tableau 10 : Statistiques quantiliques des écarts à normale en pourcentage

Référence 1961-90	Années sèches					Médiane	Années pluvieuses				
Périodes de retour	100 ans	50 ans	20 ans	10 ans	5 ans	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Nord	31%	35%	42%	50%	61%	90%	133%	162%	192%	231%	262%
Nord-Centre	13%	16%	20%	25%	34%	62%	114%	159%	210%	288%	358%
Centre	7%	9%	12%	17%	25%	52%	108%	158%	216%	308%	391%
Centre-sud	4%	6%	9%	12%	19%	46%	113%	185%	278%	445%	611%
Sud	2%	3%	5%	7%	13%	40%	119%	212%	340%	611%	831%

Source :STUDI Eau 2050

L'analyse quantilique a permis de dresser les courbes suivantes qui couvrent les fluctuations pour cinq étages hydro-climatiques.

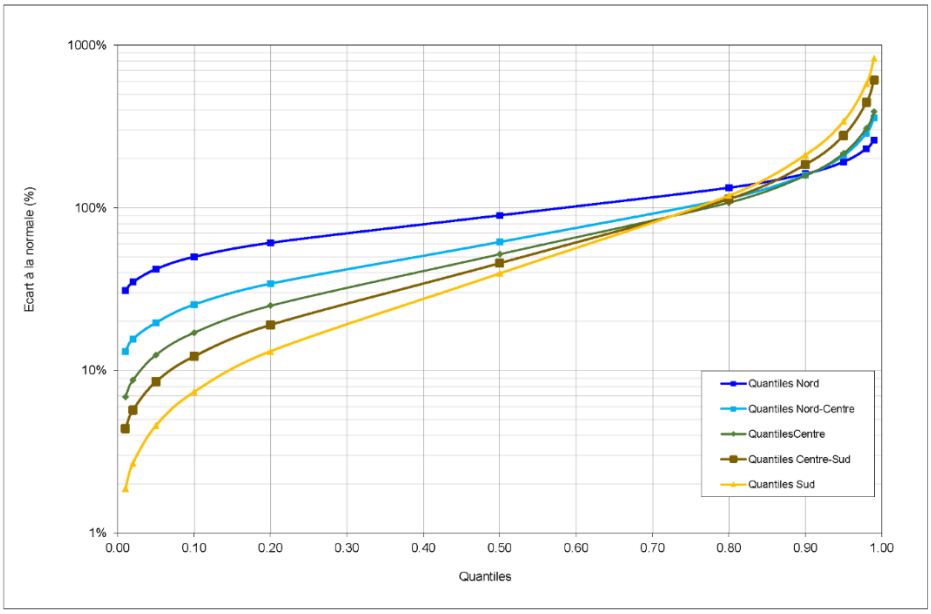


Figure 95 : Analyse quantilique comparative de l'hydrologie du centre et du sud de la Tunisie

Source :STUDI Eau 2050

La distribution des percentiles du nord-centre et du centre-sud (croisement entre les percentiles du centre et du sud) seront appliqués dans les scénarios hydro-climatiques futurs à l'horizon 2050.

Ainsi, le tableau et la figure montrent que les changements hydrologiques de la Tunisie conséquents au réchauffement climatique seraient probablement comme suit[27] :

Aridification des régimes hydrologiques. Les régimes hydrologiques connus plus au sud impriment leurs marques sur les cours d'eau du centre et les régimes hydrologiques connus plus au centre impriment leurs marques sur les cours d'eau du nord ;

Tarissement des régimes hydrologiques. Tendances à la baisse des écoulements ;

Exaspération des extrêmes. Crues plus fréquentes et/ou d'amplitudes plus fortes.

Sécheresses structurelles, annuelles et pluriannuelle, avec une plus forte amplitude.

[27] ZAHAR Y. (2006) : Guide d'information sur la vulnérabilité et l'adaptation aux changements climatiques. Agence Nationale de Maîtrise de l'Energie. Centre d'information sur l'énergie durable et l'environnement. 143 pages. I.S.B.N. : 978-9973-61-956-3

2.1.2.3 Les forçages sédimentologiques : Rythme de sédimentation des barrages et espérance de vie probable

La démarche adoptée prend en compte l'information accumulée au fil des ans sur le sujet, notamment les niveaux d'envasement des barrages atteints en service, et les séries annuelles de transport solide observées[28].

Les mesures effectuées à l'intérieur des retenues des barrages, à cause du piégeage progressif des sédiments apportés, sont vraisemblablement le meilleur moyen de *quantification globale et à long terme du transport solide*. D'abord parce que les réservoirs piègent toutes sortes de particules solides transportées (en suspension et en charriage), de plus ils rendent compte, quoique globalement, des conséquences de tous les facteurs physiques de la dynamique érosive et de transport solide, mais également humain, notamment la façon de gérer et d'exploiter la retenue d'un barrage. Les premières années de service d'un barrage, lorsqu'elles sont suffisamment exhaustives (plus de 15 à 20 ans de service), permettent une estimation du rythme moyen d'envasement, compte tenu de toutes les conditions de l'environnement naturel et humain du bassin versant et des modes de gestion de la retenue. On peut donc admettre, qu'après une première période d'exploitation, l'impact de ces facteurs sur l'envasement d'un réservoir, sont peu fluctuants, comparativement aux aléas climatiques, (essentiellement les événements extrêmes), et représentatifs durant la durée de service restante du barrage (hypothèse de stationnarité).

Rythme moyen de sédimentation des barrages

Toutes capacités confondues, les barrages de Tunisie perdent de leurs capacités de mobilisation par les dépôts sédimentaires l'équivalent chaque année de 22 millions m^3/an. C'est autant de manque d'eau dans les barrages. Le rythme d'envasement est variable mais en moyenne de 1%/an (10% de pertes de capacités de stockages tous les dix ans)[29]. La figure ci-après présente la projection tendancielle à 2050 de l'envasement au barrage Nebhana avec un taux de sédimentation moyen.

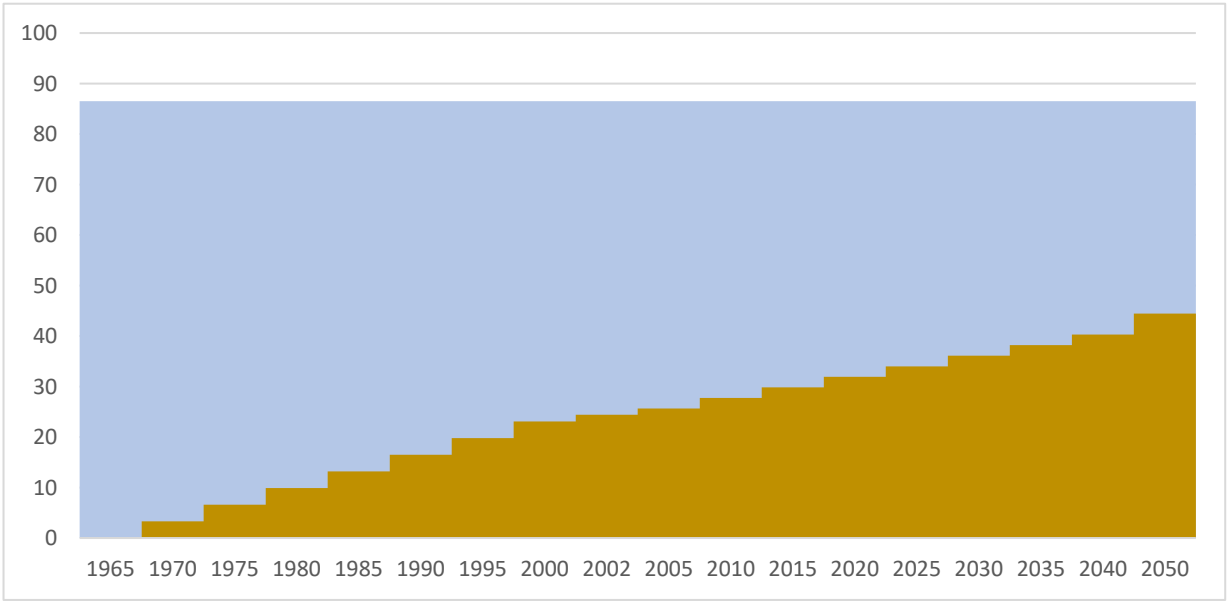


Figure 96 : rythme d'envasement moyen à Nebhana (1965-2050)

Source : DGBGTH ,ONAGRI traitement STUDI

[28] ZAHAR Y. (1997) : Eléments d'hydrologie pour l'aménagement. Modélisation spatiale et temporelle des précipitations extrêmes et érosives en Tunisie centrale. Université de La Manouba - Volume V, 287 pages. Imprimerie officielle de la république tunisienne. I.S.B.N. : 9973-936-13-2

[29] Studi International, GKW (2019) : Rapport volume 1 : Mobilisation & gestion hydrique / utilisation durable des ressources hydraulique. Version définitive. Etape 2 : Réalisation du diagnostic / état des lieux du secteur de l'eau et élaboration des orientations de base.

Estimation probabiliste des durées de service futures des barrages en Tunisie

Une des préoccupations majeures en matière de gestion et de planification des ressources en eau de surface de la Tunisie, concerne les risques qu'il y a d'un comblement rapide des barrages. Malgré un suivi périodique de l'envasement pour la majorité d'entre eux actuellement en service, on doute encore sur leurs probabilités de longévité, et beaucoup d'incertitudes subsistent. La difficulté c'est que ce risque est une variable aléatoire, qui fluctue, surtout en fonction des aléas climatiques, notamment les pluies ou les crues exceptionnelles.

Pour étudier statistiquement les probabilités de longévité des barrages, il faut théoriquement disposer de séries annuelles suffisamment exhaustives des apports solides dans les barrages, pour pouvoir analyser les écarts à la moyenne. Naturellement cela n'est pas possible à réaliser à partir de quelques campagnes de mesures de l'envasement des barrages. La génération stochastique de très longues séries de débits solides est un bon outil pour contourner cette difficulté.[30]

La démarche adoptée pour l'estimation de la durée de service probable pour les barrages prend en compte l'ensemble de l'information accumulée au fil des ans sur le sujet, notamment, les campagnes réalisées pour mesurer l'envasement de certains barrages, quelques séries annuelles de transport solide en suspension observées en Tunisie.

Des campagnes de mesures de l'envasement des barrages ont été réalisées : une première en 1975, réalisée avec la collaboration de l'ORSTOM et a concerné 7 barrages (GHORBEL & CLAUDE, 1977), et une deuxième en 1991, et a concerné 6 barrages (ABID, 1992). La dernière campagne de mesure a été réalisée en 2007[31]. En dehors de ces campagnes, il y a eu pour certains barrages des mesures plus ou moins régulières. Le barrage le plus ancien de Nebeur sur l'oued Mellègue a connu un rythme de sédimentation relativement rapide, étant donné l'importance de sa retenue, il a fait l'objet d'un suivi plus fréquent.

Toutes les informations relatives à l'état d'envasement de chacun des barrages sont sur le site de la DGBGTH.[32]

Tableau 11 : Mesures de l'envasement des barrages

Barrage	Mise en eaux	Capacité (Mm^3)	Période	Erreur type	Durée de service	Alluvionnement total (Mm^3)	Alluvionnement moyen (Mm^3/an)	Rythme annuel d'envasement
Sejnane	1994	137,5	1994-2002	35%	8	2,70	0,3375	0,25%
El Harka	2012	30,3	-	-	-	-	-	-
Ghezala	1984	11,7	1984-1993	33%	9	0,20	0,0222	0,19%
Joumine	1983	129,9	1983-2000	24%	17	10,80	0,6353	0,49%
Ziatine	2012	33	-	-	-	-	-	-
Melah	2015	41	-	-	-	-	-	-
Tine	2015	43	-	-	-	-	-	-
Sidi Salem	1981	814	1981-2002	22%	21	139,00	6,6190	0,81%
Barrak	1999	286,514	-	-	-	-	-	-
Moula	2013	26,3	-	-	-	-	-	-
Kasseb	1968	81,875	1968-1986	24%	18	2,80	0,1556	0,19%

[30] ZAHAR Y. (2001) : L'estimation probabiliste des durées de service futures des barrages en Tunisie. Essai de caractérisation et proposition d'une formule régionale. *La Houille Blanche, n°1/2001. pp .107-116.*
[31] Abdallah Ben Mammou et M. H. Louati : Évolution temporelle de l'envasement des retenues de barrages de Tunisie.
[32] http://www.onagri.nat.tn/barrages

Tableau 11 : Mesures de l'envasement des barrages

Barrage	Mise en eaux	Capacité (Mm^3)	Période	Erreur type	Durée de service	Alluvionnement total (Mm^3)	Alluvionnement moyen (Mm^3/an)	Rythme annuel d'envasement
Zarga	2012	24	-	-	-	-	-	-
Kebir	2014	64,4	-	-	-	-	-	-
Ben Metir	1954	61,63	1954-1990	17%	36	0,96	0,0267	0,04%
Bouheurtma	1976	117,5	1976-1993	24%	17	2,00	0,1176	0,10%
Barbara	1998	74,82	-	-	-	-	-	-
Mellègue[33]	1954	267,67	1954-2000	15%	46	179,00	3,8913	1,45%
Lakhmess	1966	8,22	1966-2000	17%	34	3,30	0,0971	1,18%
Rmil	2002	4	-	-	-	-	0,2185	5,46%
Gamgoum	2012	18,3	-	-	-	-	-	-
Siliana	1987	70	1966-2002	26%	15	16,90	1,1267	1,61%
El Hjar	1995	7,8	-	-	-	-	0,1068	1,37%
Lebna	1986	30,1	1986-2002	25%	16	6,22	0,3888	1,29%
Hma	2002	12,1	-	-	-	-	0,1341	1,11%
Abid	2002	10	-	-	-	-	0,0945	0,95%
Bezirk	1959	6,5	1959-1993	17%	34	2,30	0,0676	1,04%
Chiba	1963	7,8	1963-1995	18%	32	3,75	0,1172	1,50%
Masri	1968	6,9	1968-1991	21%	23	0,88	0,0383	0,55%
Rmel	1998	22	-	-	-	-	0,6833	3,11%
Nebhana	1965	86,5	1965-2002	16%	37	24,40	0,6595	0,76%
Bir Mcherga	1971	52,9	1971-2002	18%	31	11,40	0,3677	0,70%
El Haouareb	1989	95,3	1989-1998	33%	9	13,30	1,4778	1,55%
Sidi Saad	1981	209	1981-2000	23%	19	55,20	2,9053	1,39%
Sidi aich	1997	88	-	-	-	-	0,2850	0,32%
El Brek	2002	16	-	-	-	-	0,3194	2,00%
Sficifa	2005	4,24	-	-	-	-	0,1897	4,47%

Source :DGBGTH

[33] Barrage de Nebeur sur l'oued Mellègue

Longévités probables des barrages

L'envasement du barrage Nebeur sur l'oued Mellègue, permet de se rendre compte d'une certaine variabilité temporelle du rythme de son envasement, qui semble se stabiliser ces dernières décennies :

Tableau 12 : Rythme d'envasement du barrage Mellègue

Barrage	Sup. BV (Km^2)	Capacité (Mm^3)	Période	Durée de service	Envasement total (Mm^3)	Rythme annuel d'env.	Durée de vie probable
Nebeur	10 308	267,67	1954-1958	5 ans	13,4	1,00%	100 ans
			1954-1968	15 ans	24,77	0,62%	162 ans
			1954-1975	21 ans	47,6	0,85%	118 ans
			1954-1980	26 ans	87	1,25%	80 ans
			1954-1991	37 ans	121,86	1,23%	81 ans
			1954-2000	46 ans	179	1,45%	69 ans

Source :DGBGTH

Des coefficients de longévité des barrages ont été calés en Tunisie par l'analyse stochastique des séries de transport solide[34], et par l'ajustement aux coefficients de longévité isoquantiliques, d'une espérance de vie (ou de service) dont l'expression est :

$$C_{l,F} = 10^{(\alpha \,.\, u_F)/\sqrt{n}}$$

$C_{l,F}$: Coefficient de longévité.

n : Durée de service probable.

U_F : Variable de Gauss.

α : paramètre de calage régional (α = 0,4).

A titre d'exemple, l'envasement total du barrage Nebeur était programmé pour 2015, soit une durée de vie probable égale à 61 ans. On peut désormais affirmer, qu'à 90% de chance, cette fin de service serait comprise entre 2004 et 2028. Aujourd'hui le remplacement de ce barrage est déjà programmé.

A l'aide de ce coefficient de longévité on peut calculer toutes les probabilités de longévités pour les différents barrages de la Tunisie. On s'est limité à estimer cette longévité pour les barrages dont la probabilité de service est inférieure ou égale à 100 ans.

[34] ZAHAR Y., LABORDE J.P. (1998) : Une méthode stochastique pour la détermination pratique des fluctuations probables des durées de service des réservoirs collinaires en Tunisie. Revue des sciences de l'eau n°11(1). pp. 25-42.

Tableau 13 : Probabilités de longévité des barrages

Catégories	Barrage	Mise en eaux	Capacité (Mm^3)	Rythme annuel d'envasement	Durée de vie 10%	Fin de vie 10 %	Durée de vie 50%	Fin de vie 50 %	Durée de vie 90%	Fin de vie 90 %	Espérance de vie probable à 80%
Les barrages dont la fin de service probable est avant 2050	Mellegue	1954	267,67	1,45%	60	2014	69	2023	79	2033	2014-2033
	Siliana	1987	70,00	1,61%	53	2040	62	2049	72	2059	2040-2059
	Chiba	1963	7,80	1,50%	58	2021	67	2030	77	2040	2021-2040
Les barrages récents à faible espérance de vie probable (<100 ans et avant 2050) : estimation des espérances de vie probables régionalement ;	Rmel	1998	22,00	3,11%	0	1998	0	2030	0	1998	2024-2038
	Sidi aich	1997	88,00	3,78%	0	1997	0	2023	0	1997	2032-2048
	Sficifa	2005	4,24	4,47%	17	2022	22	2027	29	2034	2022-2034
	Rmil	2002	4,00	5,46%	14	2016	18	2020	24	2026	2016-2026
Les barrages dont la fin de service probable est après 2050	Lakhmess	1966	8,22	1,18%	75	2041	85	2051	96	2062	2041-2062
	Lebna	1986	30,10	1,29%	68	2054	77	2063	89	2075	2054-2075
	Bezirk	1959	6,50	1,04%	85	2044	96	2055	108	2067	2044-2067
	Nebhana	1965	86,50	0,76%	118	2083	131	2096	145	2110	2083-2110
	El Haouareb	1989	95,30	1,55%	56	2045	64	2053	75	2064	2045-2064
	Sidi Saad	1981	209,00	1,39%	63	2044	72	2053	83	2064	2044-2064
Les barrages récents à moyenne espérance de vie probable (<100 ans et après 2050) : estimation des espérances de vie probables régionalement ;	El Hjar	1995	7,80	1,37%	64	2059	73	2068	84	2079	2059-2079
	Hma	2002	12,10	1,11%	80	2082	90	2092	102	2104	2082-2104
	Abid	2002	10,00	1,07%	83	2085	94	2096	106	2108	2096-2121
	El Brek	2002	16,00	2,00%	42	2044	50	2052	59	2061	2044-2061
Les barrages dont la fin de service probable est après 2100	Sejnane	1994	137,50	0,25%	384	2378	407	2401	432	2426	2378-2426
	Ghezala	1984	11,70	0,19%	500	2484	527	2511	554	2538	2484-2538
	Joumine	1983	129,90	0,49%	188	2171	204	2187	222	2205	2171-2205
	Sidi Salem	1981	814,00	0,81%	111	2092	123	2104	137	2118	2092-2118
	Kasseb	1968	81,88	0,19%	500	2468	526	2494	554	2522	2468-2522
	Ben Metir	1954	61,63	0,04%	2255	4209	2311	4265	2369	4323	4209-4323
	Bouheurtma	1976	117,50	0,10%	962	2938	999	2975	1037	3013	2938-3013
	Masri	1968	6,90	0,55%	165	2133	180	2148	197	2165	2133-2165
	Bir Mcherga	1971	52,90	0,70%	130	2101	144	2115	159	2130	2101-2130

Tableau 13 : Probabilités de longévité des barrages

Catégories	Barrage	Mise en eaux	Capacité (Mm^3)	Rythme annuel d'envasement	Durée de vie 10%	Fin de vie 10 %	Durée de vie 50%	Fin de vie 50 %	Durée de vie 90%	Fin de vie 90 %	Espérance de vie probable à 80%
Les barrages récents dans la région extrême-nord à forte espérance de vie probable (>100 ans) : estimation des espérances de vie probables régionalement ;	El Harka	2012	30,30								
	Ziatine	2012	33,00								
	Melah	2015	41,00								
	Tine	2015	43,00								
	Barrak	1999	286,51								
	Moula	2013	26,30								
	Zarga	2012	24,00								
	Kebir	2014	64,40								
	Barbara	1998	74,82								
	Gamgoum	2012	18,30								

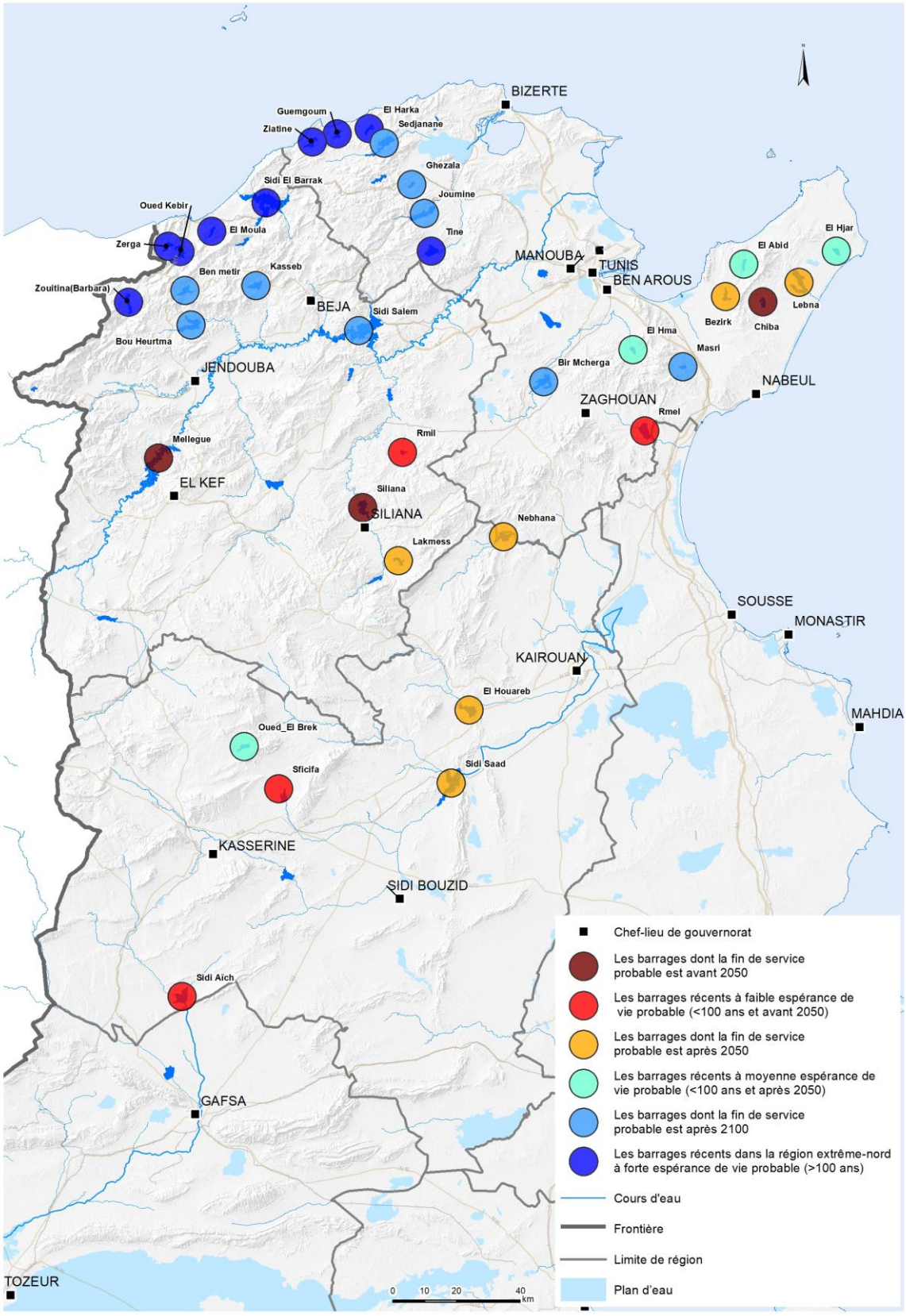


Figure **97**: Catégories des barrages selon leurs durées de vie

Source : STUDI Eau 2050

On estime que les barrages perdent annuellement 1% de leur capacité globale, soit l'équivalent de la moyenne des barrages dans le monde (la banque mondiale estime en effet que les réservoirs des barrages dans le monde perdent chaque année 1% de leur capacité globale).

Deux paroxysmes cataclysmiques de transport solide ont, à ce jour, étés enregistrés en Tunisie, consécutivement aux crues de 1969 et 1973. Ils méritent d'être rappelés, pour montrer les risques en cas d'événements extrêmes :

Les crues complexes de septembre-octobre 1969 ont fait transiter 275 millions de m^3 de sédiments par la station de Sidi Saâd de l'oued Zeroud (CRUETTE & RODIER : 1971)[35].

La crue du 27 mars au 1er avril 1973, sur l'oued Medjerda a charrié des sédiments estimés à 100 millions de tonnes environ, et qui se sont déposés dans la basse vallée de la Medjerda et jusqu'à la mer (CLAUDE & al., : 1977)[36].

Ces deux événements se sont produits avant la mise en service des barrages ; respectivement Sidi Salem sur l'oued Medjerda (réalisé en 1981, capacité : 814 millions de m3), et Sidi Saâd sur l'oued Zeroud (réalisé en 1981, capacité : 209 millions de m3). Si jamais ils avaient étés consécutifs à la mise en eau des barrages, ils auraient engendré un envasement de l'ordre de 12% pour Sidi Salem, mais un comblement certainement total pour Sidi Saâd, en supposant bien sûr que tous les sédiments apportés auraient été piégés dans la retenue.

2.1.2.4 Les forçages limnologiques

Le suivi et le contrôle de la qualité des eaux des cours d'eau, des lacs et sebkhas et des nappes souterraines sont essentiels pour le développement durable et pour la santé, en raison des services de base et des activités économiques qui en dépendent. Le fait de connaître la qualité des ressources permet de comprendre l'incidence du développement socio-économique sur la qualité des réserves d'eau dans le temps, ainsi que le type de services que peuvent fournir les écosystèmes (eau potable, irrigation, usage industriel, protection de la biodiversité, pêche). Cela nous permet de repérer les zones où la qualité de l'eau est menacée et celles où elle reste intacte.

Selon la Banque Mondiale[37] , la Tunisie subit une perte d'environ 1% du PIB chaque année due à la mauvaise qualité de l'eau, ce qui est supérieur à la moyenne dans la région MENA (figure [38]suivante) :

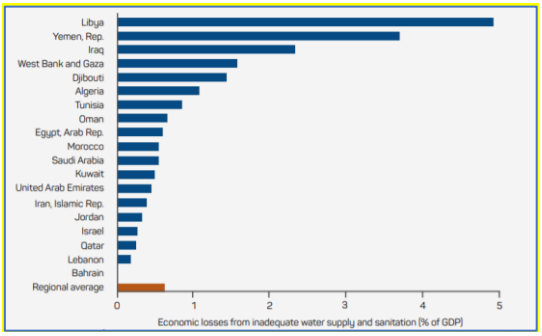


Figure 98 : Pertes Économiques des Pays de MENA en rapport avec la qualité de l'eau potable et de l'assainissement (2016)

Source : BM, 2018

[35] CRUETTE, J & RODIER, J.A. (1971) Mesure de débits de l'oued Zeroud pendant les crues exceptionnelles de l'automne 1969. Cahier ORSTOM série hydrologie. Vol XIII n°1. pp. 33-64.
[36] CLAUDE, J & CHARTIER, R. (1977) Mesure de l'envasement dans les retenues de six barrages en Tunisie, campagne de 1975. Cahier ORSTOM série hydrologie. Vol XIV n°1. pp 3-35.
[37] Banque Mondiale (2018) : Beyond Scarcity : Water Security in the Middle East and North Africa.
[38] GIZ (2019) : Evaluation Nexus Interdépendances des secteurs de l'eau, de l'énergie et de l'alimentation en Tunisie. Publié par Nexus Dialogue Programme dans la région MENA (NRD)

La qualité de l'eau varie sur le plan spatial, c'est-à-dire en fonction de l'utilisation des terres, du climat et des caractéristiques géologiques, mais également sur le plan temporel. La qualité est soumise à diverses influences naturelles et anthropiques, telles que le climat ou le rejet des eaux usées ou les ruissellements d'origine agricole.

Qualité des eaux des barrages

Une forte corrélation entre la salinité des eaux mobilisées dans les barrages et les apports annuels est démontrée dans une étude menée par STUDI international en 2013 sur les trois barrages[39] du Kairouanais. Le graphique ci-après présente la corrélation entre la salinité et les apports au barrage Nebhana à titre d'exemple.

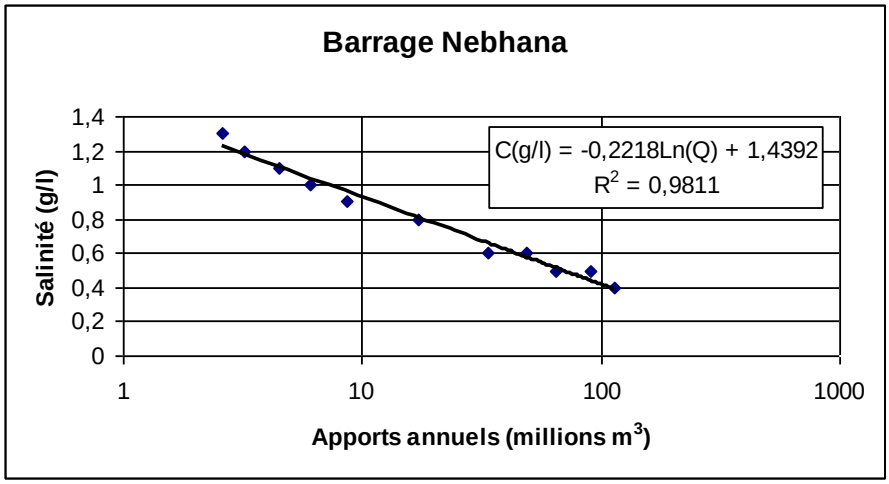


Figure 99 : Ajustement de la salinité des eaux de Nabhana en fonction des apports

Source : STUDI Eau 2050

La corrélation entre la salinité et les apports est intégrée dans le modèle pour pouvoir faire varier ce paramètre en fonction du remplissage du barrage.

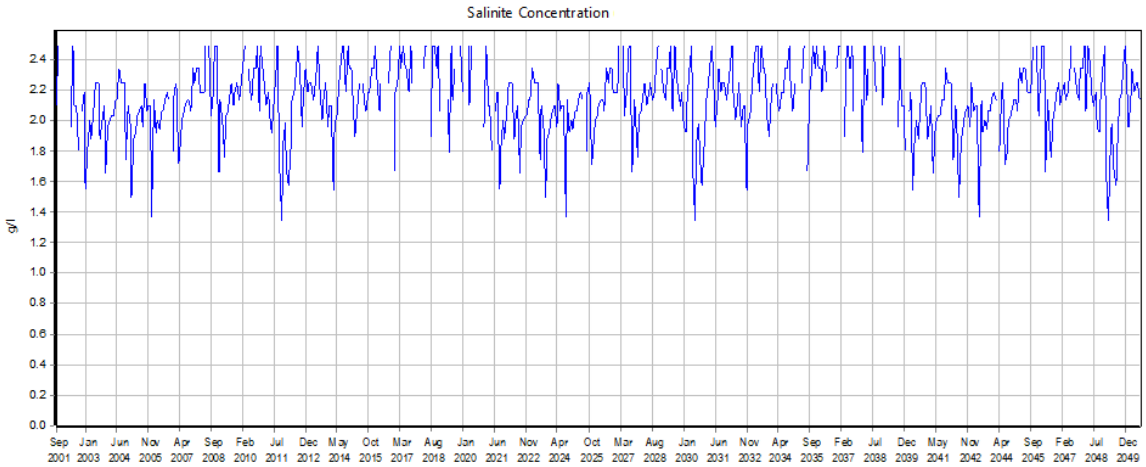


Figure 100 : Salinité des eaux du barrage Nebhana telle qu'implémentée dans le modèle jusqu'à 2050

Source : STUDI Eau 2050

[39] STUDI INTERNATIONAL (2014) : ETABLISSEMENT D'UN DIAGNOSTIC CONCERTE ET BILANS ACTUALISES DES TROIS BARRAGES DE KAIROUAN DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE. VOLET 2 : ANALYSE ET MODELISATION AU NIVEAU DES TROIS BASSINS. GIZ/MEDD

2.1.3 Sorties modèle des bilans des barrages

Bilans annuels de quelques barrages structurants

Bouheurtma

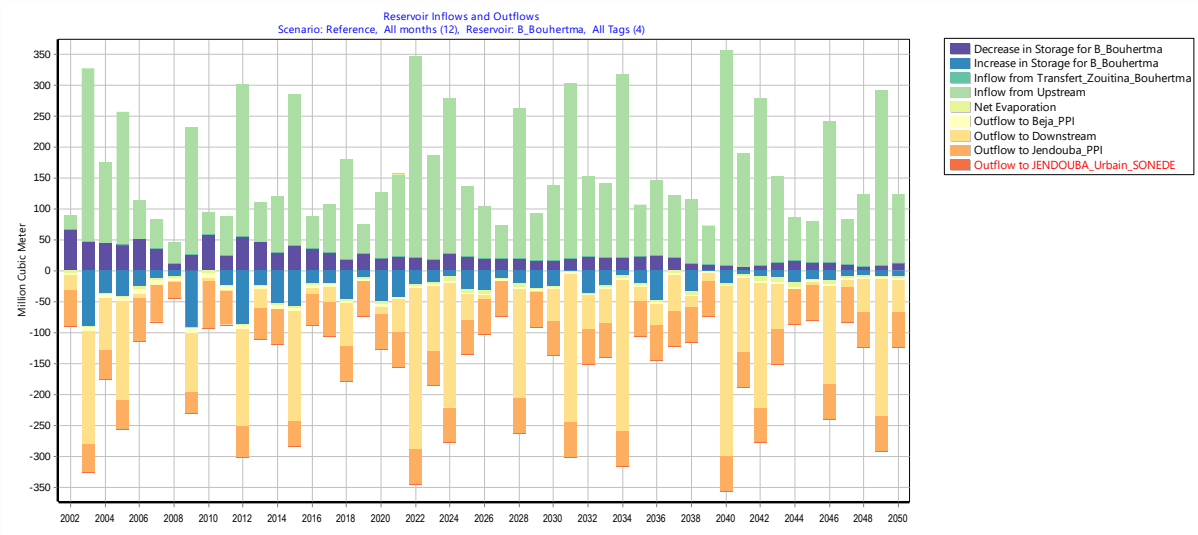


Figure 101 : Bilan annuel du barrage Bouhertma

Source : STUDI Eau 2050

Sidi Salem

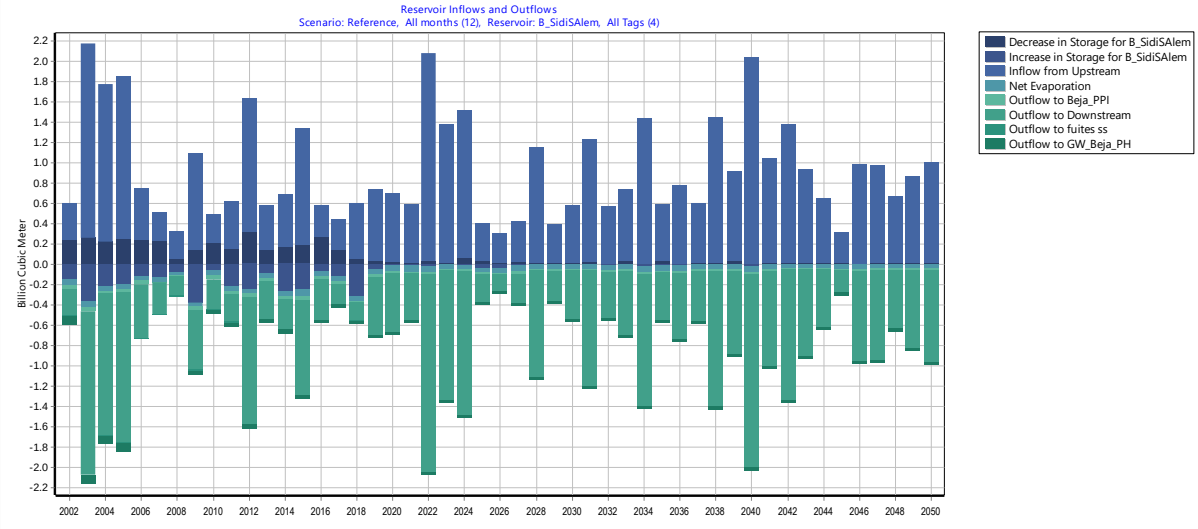


Figure 102 : Bilan annuel du barrage Sidi Salem

Source : STUDI Eau 2050

Sedjnene

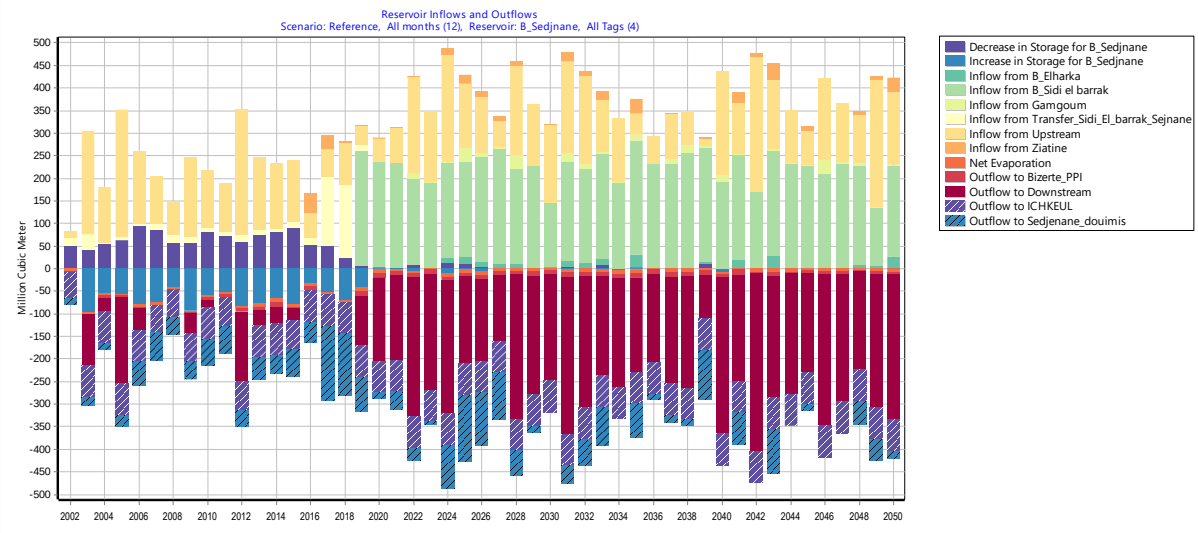


Figure 103 : Bilan annuel du barrage Sedjnene

Source : STUDI Eau 2050

Nebhana

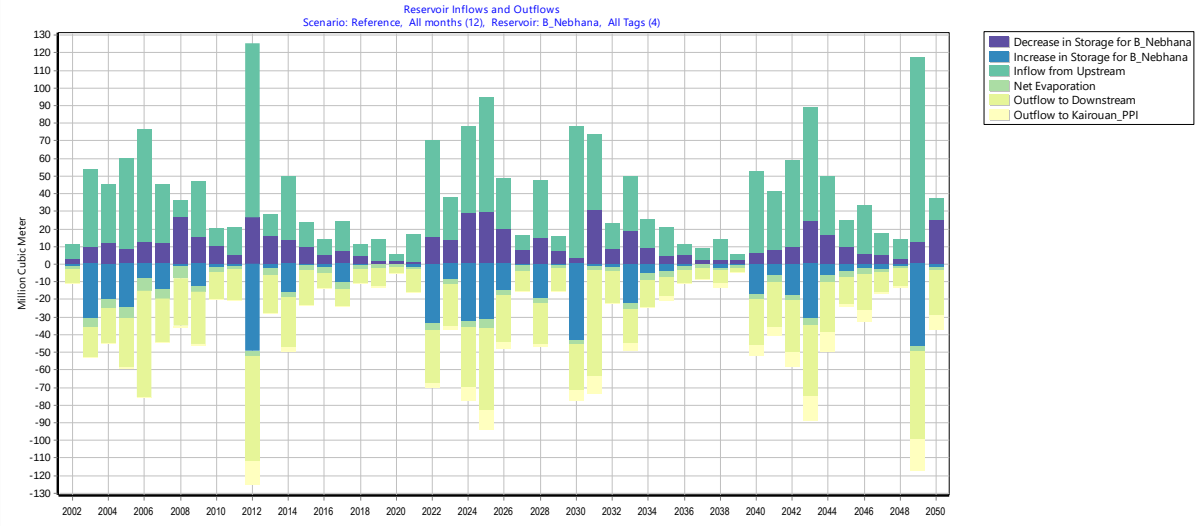


Figure 104 : Bilan annuel du barrage Nabhana

Source : STUDI Eau 2050

2.2 LES NAPPES SOUTERRAINES

2.2.1 Méthode de simulation

L'évolution de l'état des nappes d'eaux souterraines jusqu'à l'année 2050 est simulée par le modèle hydro-économique selon la démarche suivante :

Une base de données portant sur 520 nappes et 118 systèmes aquifères ;

Les stocks d'eau ont été calculés pour une année de référence qui est celle de 1992. Ce choix a été fait sur la base de la disponibilité des données surtout celles de la piézométrie, d'un bilan global d'eau souterrain encore positif et d'un volume de surexploitation global relativement faible ;

Les stocks de référence en 1992 ont été calculés pour chaque système aquifère en estimant les coefficients d'emmagasinement ainsi que la nature hydrogéologique et hydrodynamique des différents systèmes aquifères ;

L'épaisseur prise en considération est fixée arbitrairement entre 10 m pour les nappes très vulnérables à l'intrusion des eaux salines et 30 m pour les autres nappes ;

Les stocks initiaux d'eau dans les nappes ou les systèmes aquifères sont ceux correspondants à l'année 2003 (en cohérence avec la période de gestion des eaux de surface). Le stock initial (CI) du modèle à la date de 2003 a été estimé en déduisant du stock de référence (1992) les volumes surexploités de la période 1992-2003 ;

L'estimation du stock d'eau nécessite la connaissance de la superficie et du coefficient d'emmagasinement des nappes en plus de l'épaisseur de la colonne d'eau. Ces trois (3) paramètres sont extraits des annuaires de la DGRE ;

Le stock d'eau ne peut indiquer en aucun cas le volume d'eau exploitable mais il permet uniquement au modèle de suivre l'évolution des réserves de la nappe sous l'effet de l'exploitation à l'échelle du temps ;

Vu le nombre très important des nappes d'eaux souterraines et les temps de traitement par le logiciel (plusieurs heures à plus d'un jour pour une simulation), nous avons opté d'utiliser les systèmes aquifères (118) pour l'estimation des stocks d'eau et leurs variations dans le temps selon les scénarios d'exploitation ;

Les 520 nappes sont sous-jacentes au traitement des données des systèmes aquifères (accessibles par le modèle si nécessaire).

Il est à noter que nous avons extrait les informations des nappes souterraines exhaustivement et nous avons attribué à chaque nappe des labels d'exploitation (sous-exploitée, en équilibre et surexploitée) et de qualité (risque d'intrusion des eaux salines, risque de pollution). Cette information est capitalisée pour le modèle hydro-économique, suite à quoi nous avons développé une ingénierie de règle de gestion durable des nappes souterraines. L'analyse croisée offre/demande nous a permis d'interpréter la situation grave qui se projette avec un coût insupportable pour la ressource en cas d'inaction et de moduler une gestion durable des nappes souterraines sans compromettre le stock non renouvelable. Il est bien entendu que cette ingénierie nous amène à raisonner particulièrement le cas des années sèches pour lequel il sera permis d'utiliser la ressource sous la condition de revenir les années suivantes dans les meilleures conditions d'équilibres des nappes.

Tableau 14 : Labélisation des nappes

Label 1 : Catégorie de la nappe	Label 2 : Type de salinité	Label 3 : Pollution	Label 4 : Risque d'intrusion d'eau saline	Label 5 : Type de nappe	Label 6 : Type d'exploitation
Nappe sous-exploitée	Salinité faible	Concentration en Nitrate faible	Risque d'intrusion d'eau saline	Nappe profonde	Eau potable
Nappe en équilibre	Salinité moyenne	Concentration en Nitrate moyenne	Risque d'intrusion d'eau marine	Nappe phréatique	Irrigation
Nappe surexploitée	Salinité forte	Concentration en Nitrate forte		Nappe fossile	Autre

Source : STUDI Eau 2050

Illustrations de cas typiques de nappes dans différentes régions

A titre d'illustration et de présentation de la situation qui risque de s'aggraver dans les prochaines années, nous avons traité les nappes caractéristiques des difficultés actuelles ou qui risquent d'advenir. Il est entendu que les gouvernorats suivants sont sous forte contrainte d'équilibre hydraulique entre offre et demande et occasionnent une pression voire une surexploitation manifeste des nappes souterraines. Les nappes suivantes ont fait l'objet d'une analyse croisée offre et demande pour mettre en exergue les problèmes actuels et à venir.

Alluvions du Quaternaire de la Plaine de Grombalia :

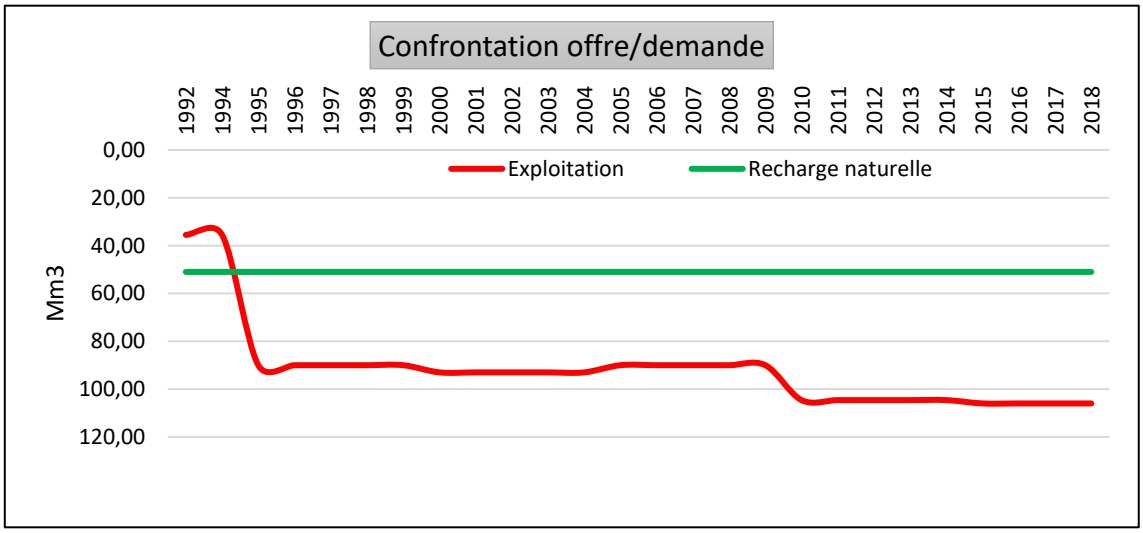
La nappe de la plaine de Grombalia est exploitée par 6 910 puits de surface équipés de pompes (DGRE 2015). Ces puits puisent annuellement environ 100 Mm3, soit une surexploitation de l'ordre de 190 % de ses ressources renouvelables estimées à 51 Mm3. Cette nappe est activement sollicitée pour l'irrigation.

La confrontation entre les ressources et les besoins fait apparaître un déficit croissant qui s'est déclenché en 1994 jusqu'à atteindre 55 Mm3 en 2018 (voir figure ci-après). La comparaison entre les cumuls de la recharge annuelle de la nappe et des prélèvements effectués sur cette nappe durant la période 1992-2018 montre un déclenchement d'un déséquilibre à partir de l'année 1994 qui s'est aggravé d'une année à l'autre : le cumul de la recharge s'élève à 1 377 Mm3 contre un cumul des prélèvements de 2 418 Mm3, soit un déficit de 1 041 Mm3 enregistré durant la période susmentionnée.

Par conclusion, l'exploitation des eaux souterraines de la nappe phréatique de la plaine de Grombalia, est devenue intensive suite à l'intensification des cultures maraîchères et à l'introduction des équipements modernes de pompage notamment le groupe motopompe, cette situation a engendré un déséquilibre entre l'exploitation et les ressources, provoquant ainsi une salinisation des nappes le long de la côte. Cette surexploitation intensive des eaux souterraines entraîne des conséquences néfastes qui se manifestent par la baisse continue du niveau piézométrique de la nappe d'une part et l'augmentation de la salinité d'autre part. L'exploitation de la nappe côtière a connu une évolution remarquable, elle a manifesté les signes les plus aigus de la surexploitation suite à une sécheresse prolongée qui provoque un déséquilibre entre les prélèvements et l'alimentation naturelle de la nappe, il en résulte, une variation quantitative que qualitative de l'aquifère. L'analyse des différentes cartes piézométriques historiques et mensuelles réalisées en 2005, montre une dégradation progressive de la piézométrie qui s'est traduite par une baisse piézométrique dans le temps suite à l'accumulation de l'effet négatif de la surexploitation. Par opposition à l'impact quantitatif de la surexploitation qui se manifeste amplement dans les zones amont, l'impact qualitatif se fait sentir le plus souvent dans les zones en aval et tout près des exutoires. C'est en liaison avec l'inversion du gradient hydraulique que se produit l'intrusion du biseau salé à l'intérieur du continent et l'envahissement par l'eau de mer de la frange côtière des aquifères. La surveillance de la situation hydrogéologique de la nappe est indispensable au contrôle de l'observation des réglementations en matière de lutte contre l'intrusion marine.[40]

[40] Gestion intégrée des ressources en eaux souterraines : cas de la plaine du Cap Bon, 2008

Nappe	Alluvions du Quaternaire de la Plaine de Grombalia
Code DGRE	41110
Type de nappe	Nappe phréatique
Type d'exploitation	Irrigation



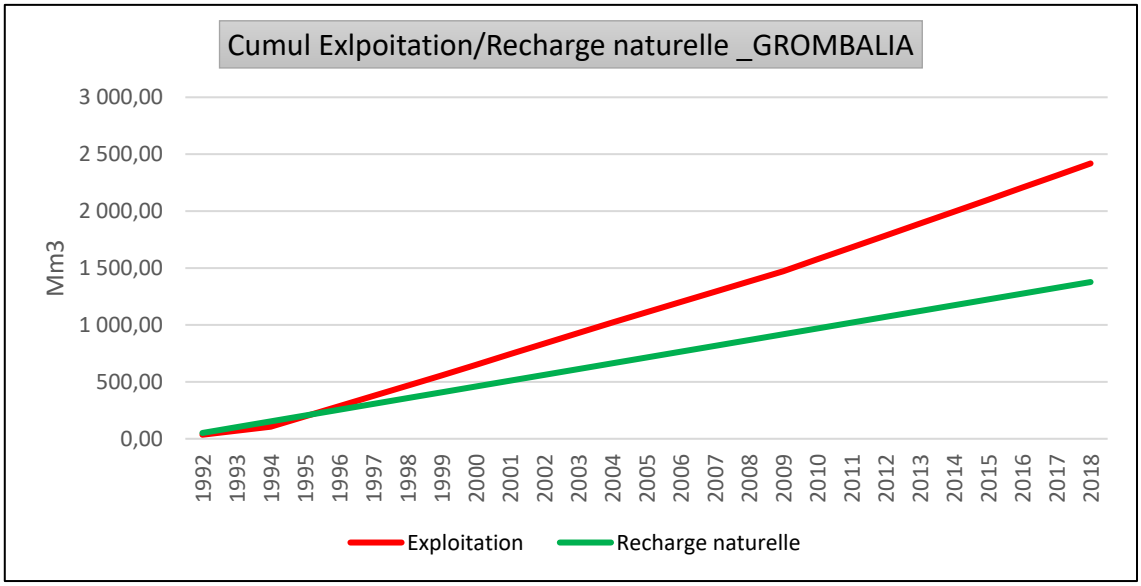


Figure 105 : Illustration de la nappe de GROMBALIA

Source : STUDI Eau 2050

Alluvions du Plio-Quaternaire de la Plaine de Zaghouan

La nappe profonde de la plaine de Zaghouan est exploitée par 145 forages (05 forages destinés pour l'usage AEP, 133 forages pour l'usage agricole et 07 forages pour l'usage industrielle, DGRE 2018). Un passage vers un régime de surexploitation est observé à partir de l'année 2004, qui ne cesse de s'amplifier jusqu'à atteindre un déficit de 5.66 Mm3 en 2018 (voir figure ci-après). Un tel virage est expliqué par l'évolution du nombre de forages destinés à l'irrigation d'une manière intensive (de 18 forages en 2003 à 133 forages en 2018). La comparaison entre les cumuls de la recharge annuelle de la nappe et des prélèvements effectués sur cette nappe durant la période 1992-2018 montre un déclenchement d'un déséquilibre à partir de l'année 2011 qui s'est aggravé d'une année à l'autre : le cumul de la recharge s'élève à 21.6 Mm3 contre un cumul des prélèvements de 48.5 Mm3, soit un déficit de 26.9 Mm3 enregistré durant la période susmentionnée.

A cet effet, une meilleure intégration entre les politiques agricoles et environnementales est nécessaire pour réduire la pression exercée sur les ressources en eau souterraine.

Nappe	Alluvions du Plio-Quaternaire de la Plaine de Zaghouan
Code DGRE	45411
Type de nappe	Nappe profonde
Type d'exploitation	Eau potable-Irrigation-Industrie

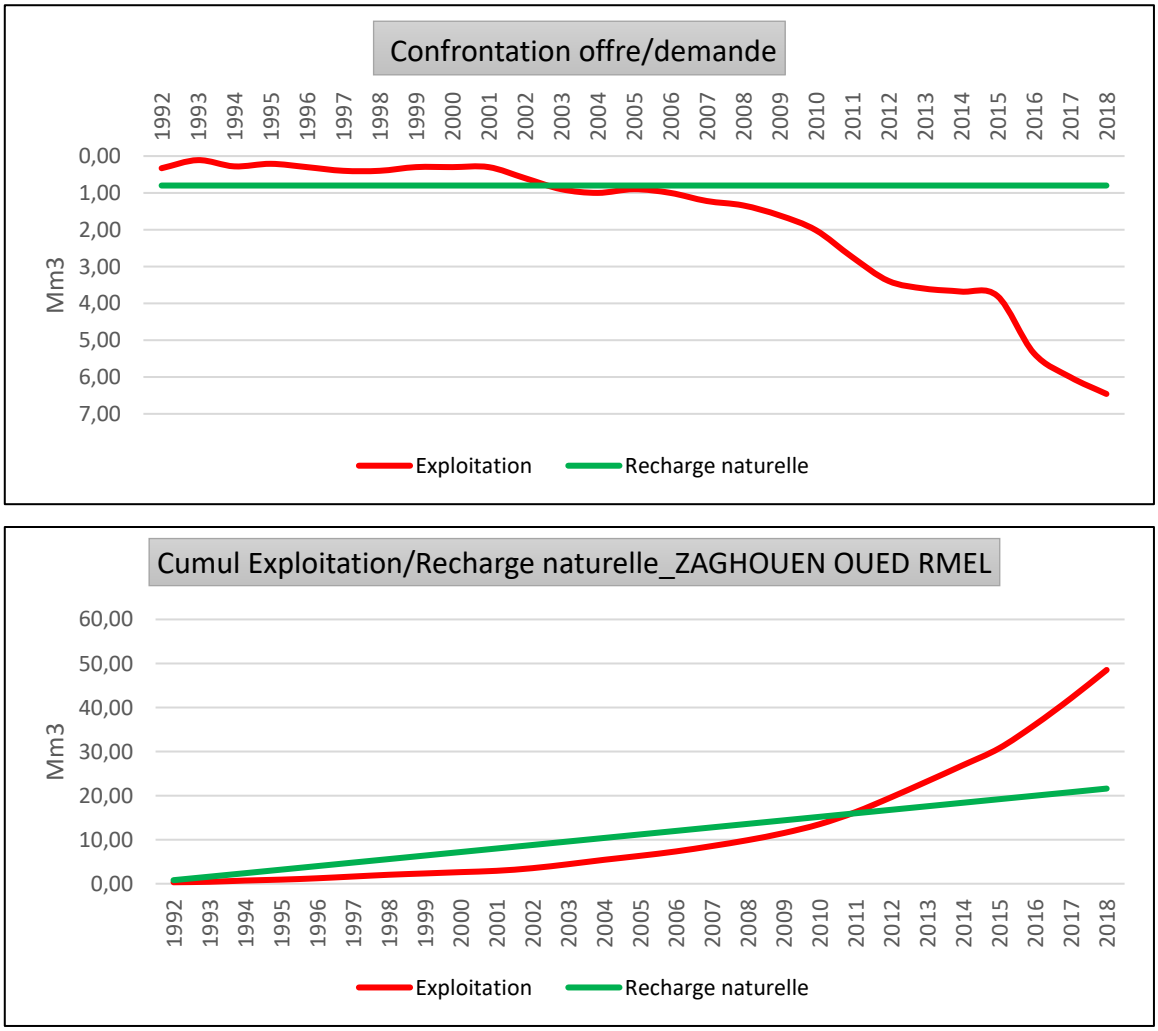


Figure 106 : Illustration de la nappe de ZAGHOUAN_OUED ELRMEL

Source : STUDI Eau205

Grès de l'Oligocène de Bou Hafna

La nappe profonde de Bou Hafna est exploitée par 45 forages (DGRE 2018). Ces puits puisent environ 16 Mm3, soit une surexploitation de l'ordre de 168 % de ses ressources renouvelables estimées à 9.5 Mm3. Cette nappe est fortement sollicitée pour l'AEP des villes de Sahel.

L'examen détaillé de l'historique de la piézométrie montre que la nappe de Bou Hafna a connue trois phases distinctes de rabattement de son plan d'eau au cours des cinq dernières décennies (1969-2015). La première phase, qui se prolongeait sur les 20 premières années (1969-1989), a été caractérisée par un taux de rabattement relativement important. Le niveau statique a passé de 12 m à 30 m et de 43 m à 66 m dans les parties amont et aval, respectivement. L'abaissement annuel moyen pendant cette phase varie entre 0,95 et 1,2 m. La deuxième phase, qui s'étendait entre 1990 et 2007, a été caractérisée par un rabattement moins important. Le niveau statique au cours de cette période a passé de 30 m à 38 m dans la partie amont et de 66 m à 74 m dans la partie aval de la nappe. Le taux moyen de ce rabattement est de 0,44 m/an. La diminution du taux de rabattement est essentiellement liée à la réduction remarquable de l'alimentation du Sahel suite à la création du projet de transfert des eaux du nord pour alimenter les villes de Sousse, Monastir et Mahdia en eaux potables.

La troisième phase, qui s'étendait entre 2007 et 2018, a été caractérisée par un rabattement très élevé par rapport à ceux enregistrés durant les phases précédentes, soit une baisse moyenne annuelle de 1.25 m/an.

En effet, au cours des années 1970 et 1980 la nappe de Bou Hafna a connu une exploitation intense ayant une valeur maximale de 18,6 Mm3 et une moyenne de 14,7 Mm3. Cette exploitation importante avait pour objectif de répondre aux besoins importants en eaux potables des villes du Sahel (Sousse, Monastir et Mahdia) et aux besoins de l'agriculture régionale. Cependant, durant la période 1980-2007 la nappe a connu une diminution remarquable de son exploitation. Les valeurs maximale et moyenne de cette exploitation ont diminué pour atteindre 14 Mm3 et 12,5 Mm3, respectivement. Cette diminution s'explique par la réduction remarquable de l'alimentation du Sahel suite à la création du projet de transfert des eaux du nord pour alimenter les villes de Sousse, Monastir et Mahdia en eaux potables. A partir de l'année 2007, l'exploitation de la nappe a augmenté d'une manière significative et a enregistré des volumes exploités compris entre 16 et 19 Mm3 durant la période 2007-2018, dont environ 95 % de ces volumes sont destinés à l'AEP.

Par ailleurs, en observant le cumul de la recharge s'élève à 247 Mm3 contre un cumul des prélèvements d'environ 386 Mm3, soit un déficit de 139 Mm3 enregistré durant la période susmentionnée.

Nappe	Grès de l'Oligocène de Bou Hafna
Code DGRE	62121
Type de nappe	Nappe profonde
Type d'exploitation	Eau potable-Irrigation-industrie

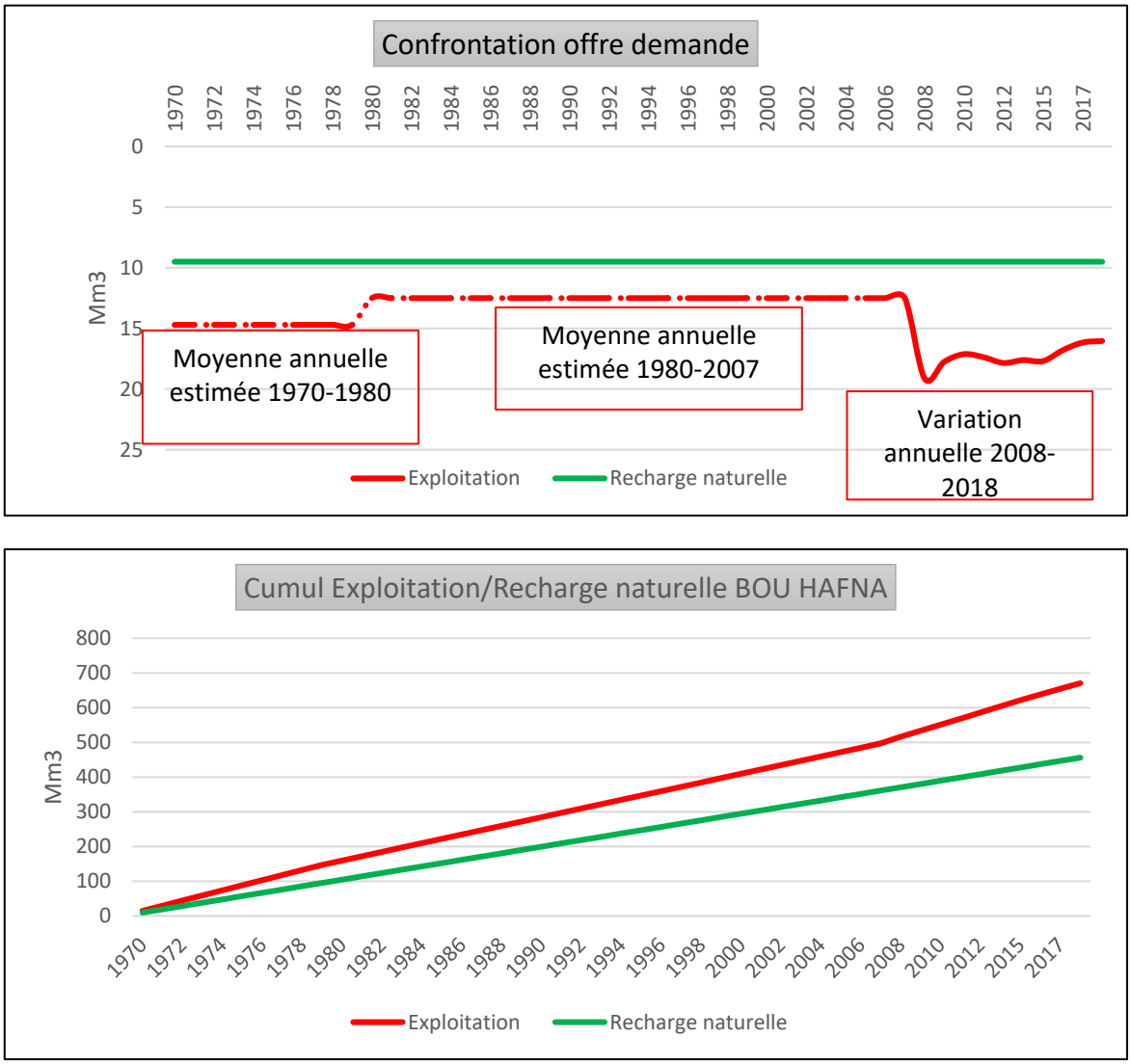


Figure 107 : Illustration de la nappe de BOUHAFNA

Source : STUDI Eau 2050

Grès du Continental Intercalaire de la Nefzaoua

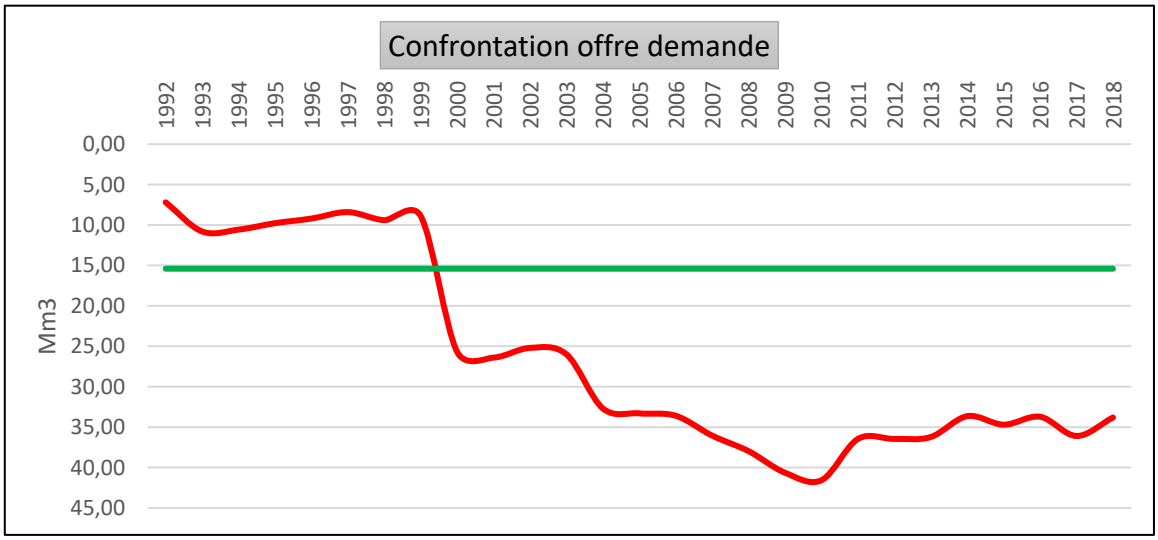
La nappe profonde de Grès du Continental Intercalaire de la Nefzaoua est exploitée par 24 forages (23 forages destinés pour l'usage agricole et 01 forage pour l'usage industrielle, DGRE 2018).

En effet, la nappe du complexe terminal connaît d'importantes modifications à caractère irréversible. Le niveau de surexploitation a atteint durant les vingt dernières années plus 260% se traduisant ainsi par le tarissement définitif des sources, la disparition de l'artésianisme, l'assèchement de la nappe dans certains endroits (à la marge de la nappe) et l'augmentation de la salinité de l'eau.

La comparaison entre les cumuls de la recharge annuelle de la nappe et des prélèvements effectués sur cette nappe durant la période 1992-2018 montre un déclenchement d'un déséquilibre à partir de l'année 2004 qui s'est aggravé d'une année à l'autre : le cumul de la recharge s'élève à 415.80 Mm3 contre un cumul des prélèvements de 714.5 Mm3, soit un déficit de 298.7 Mm3 enregistré durant la période susmentionnée.

Ceci est le résultat d'un processus ancien d'extension autour des oasis qui s'est aggravé depuis une vingtaine d'années par l'apparition et la multiplication des sondages illicites dont la gestion et le contrôle échappe totalement à l'administration technique.

Nappe	Grès du Continental Intercalaire de la Nefzaoua
Code DGRE	91311
Type de nappe	Nappe profonde
Type d'exploitation	Irrigation-Autre



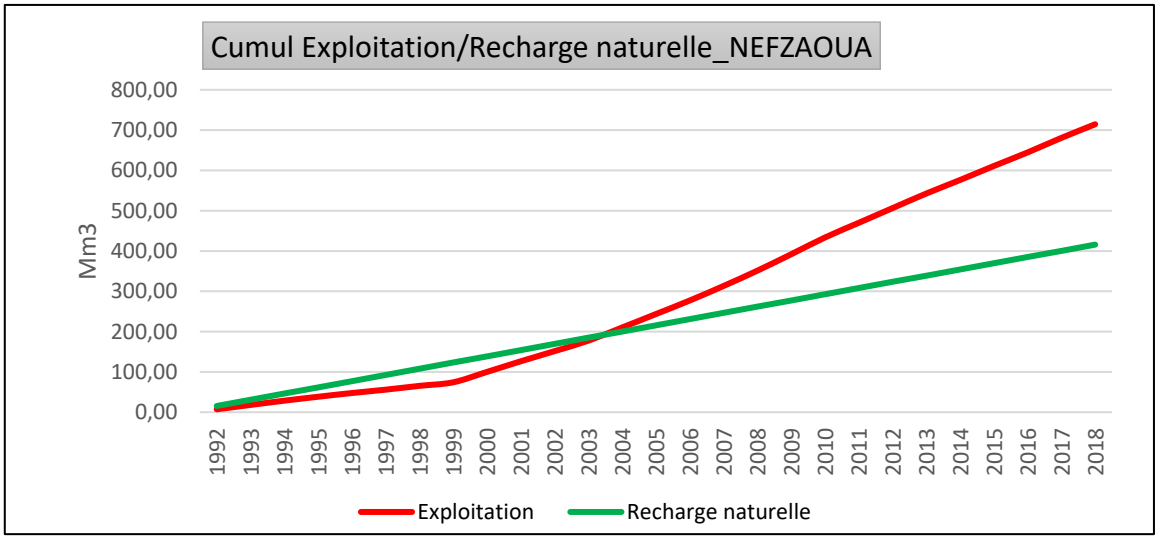


Figure 108 : Illustration de la nappe de NEFZAOUA

Source : STUDI Eau2050

Par contre, plusieurs nappes, tel que citées ci-dessous, sont encore sous exploitées et présentent encore des ressources disponibles importantes. Il faut donc orienter les nouvelles demandes en eau vers les zones ayant encore des ressources disponibles et soulager les nappes surexploitées par des mesures spécifiques surtout dans le secteur de l'agriculture irriguée.

Sables du Miocène de la Plaine d'El Haouaria

Le taux d'exploitation de cette nappe ne dépasse pas 30% durant la période observée 1992-2018.La comparaison entre les cumuls de la recharge annuelle de la nappe et des prélèvements effectués durant la période 1992-2018 montre une sous exploitation de la ressource : le cumul de la recharge s'élève à 35.10 Mm3 contre un cumul des prélèvements de 3.67 Mm3, soit un excèdent de 31.5 Mm3 enregistré durant la période susmentionnée.

Nappe	Sables du Miocène de la Plaine d'El Haouaria
Code DGRE	43121
Type de nappe	Nappe profonde
Type d'exploitation	Eau potable-Irrigation

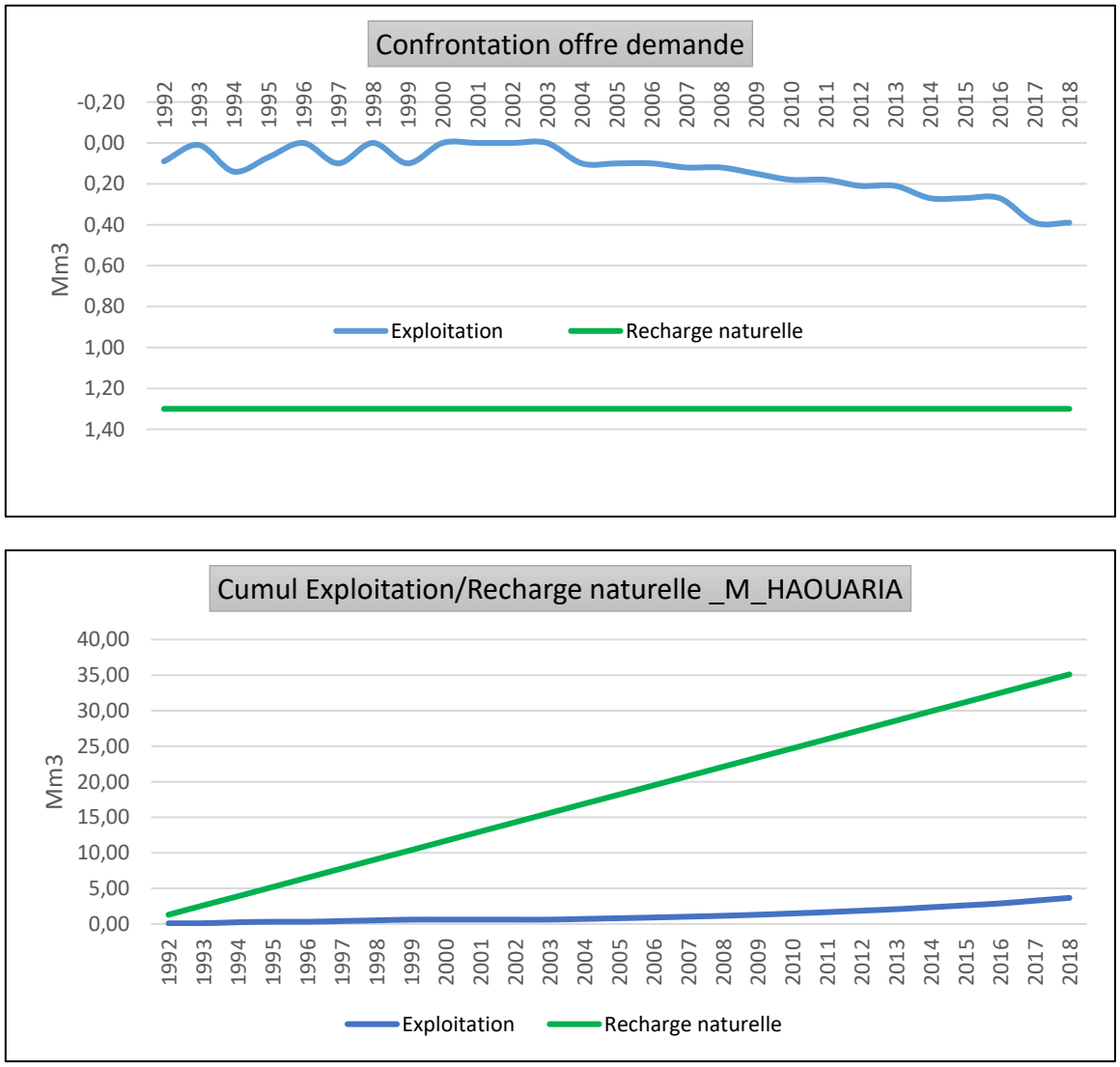


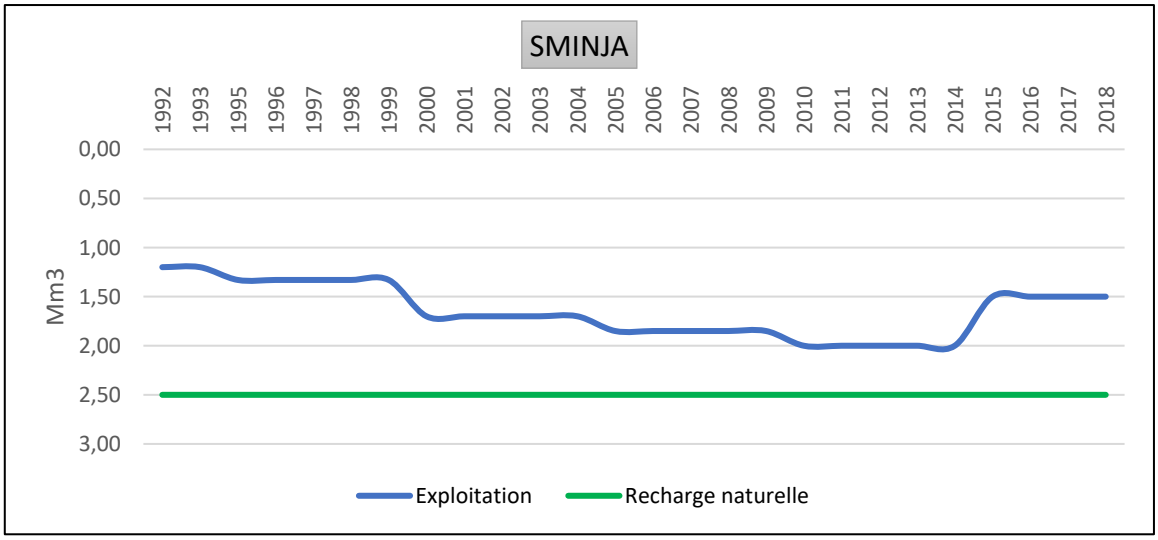
Figure 109 : Illustration de la nappe de HAOUARIA

Source : STUDI Eau2050

Alluvions du Quaternaire de la Plaine de Sminja

La comparaison entre les cumuls de la recharge annuelle de la nappe et des prélèvements effectués durant la période 1992-2018 montre une sous exploitation de la ressource : le cumul de la recharge s'élève à 67.5 Mm3 contre un cumul des prélèvements de 44 Mm3, soit un excèdent de 23.5 Mm3 enregistré durant la période susmentionnée.

Nappe	Alluvions du Quaternaire de la Plaine de Sminja
Code DGRE	32210
Type de nappe	Nappe Phréatique
Type d'exploitation	Irrigation



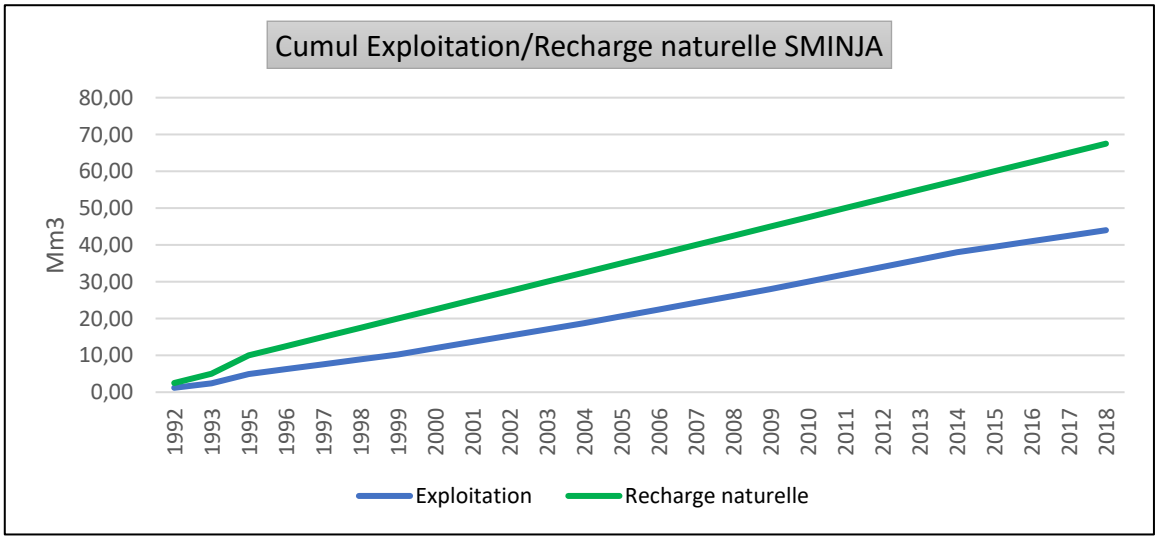


Figure 110 : Illustration de la nappe de SMINJA

Source : STUDI Eau 2050

Sables du CT du SW de Chott Djerid (Redjem Maatoug)

La comparaison entre les cumuls de la recharge annuelle de la nappe et des prélèvements effectués durant la période 1992-2018 montre une sous exploitation de la ressource : le cumul de la recharge s'élève à 1643 Mm3 contre un cumul des prélèvements de 847.52 Mm3, soit un excédent de 795.5 Mm3 enregistré durant la période susmentionnée.

Nappe	Sables du CT du SW de Chott Djerid (Redjem Maatoug)
Code DGRE	93331
Type de nappe	Nappe fossile
Type d'exploitation	Eau potable-Irrigation-Industrie

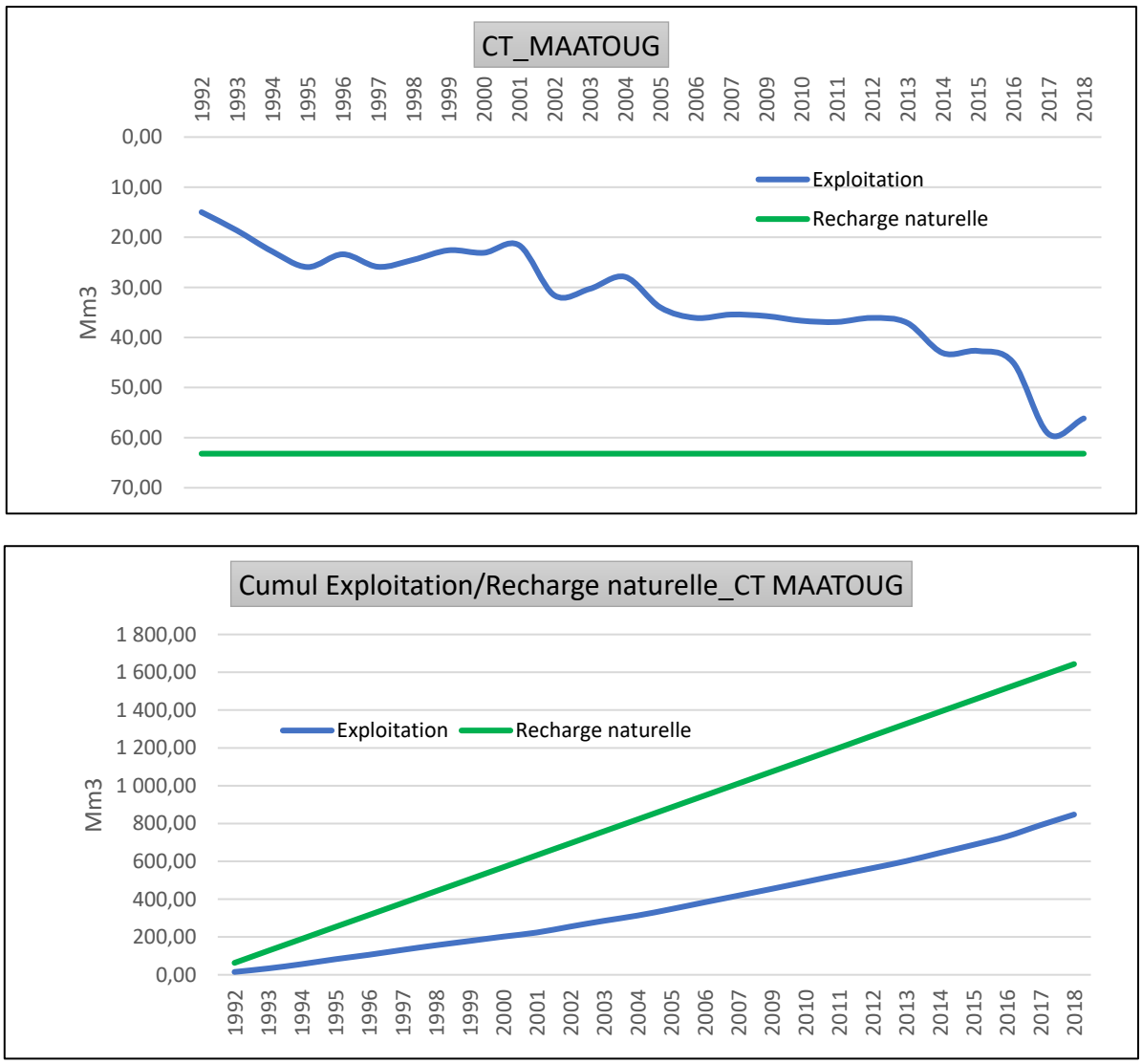


Figure 111 : Illustration de la nappe de CT MAATOUG

Source : STUDI Eau 2050

2.2.2 Résultats de la simulation

Variation du stock dans quelques systèmes aquifères

Système aquifère Bou Hafna- Serdja-Ech chouachi (608)

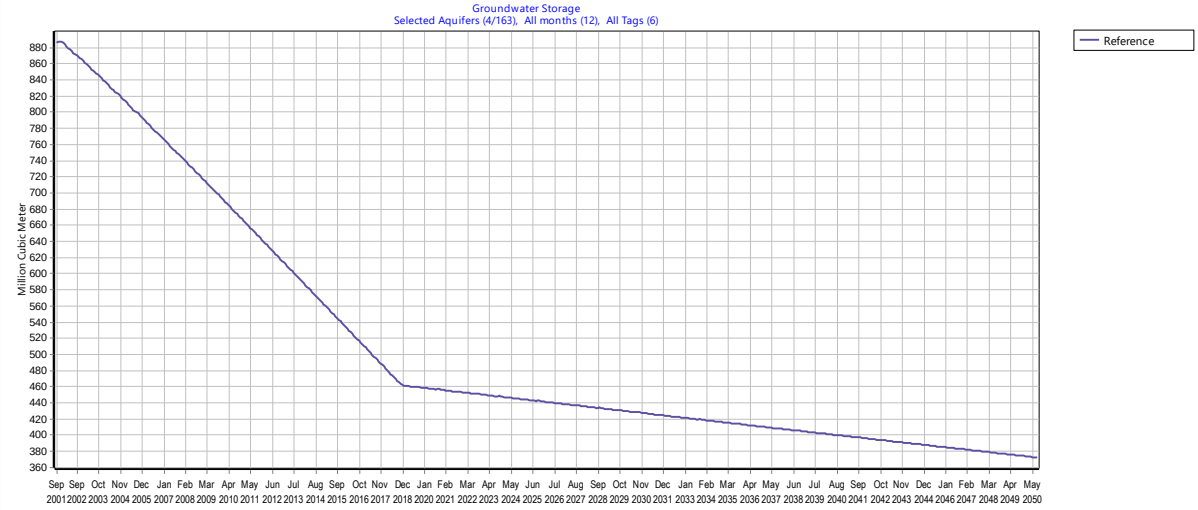


Figure 112 : Variation du stock dans le système aquifère Bou Hafna- Serdja-Ech chouachi

Source : STUDI Eau 2050

Système aquifère Plaine de Kairouan (6423)

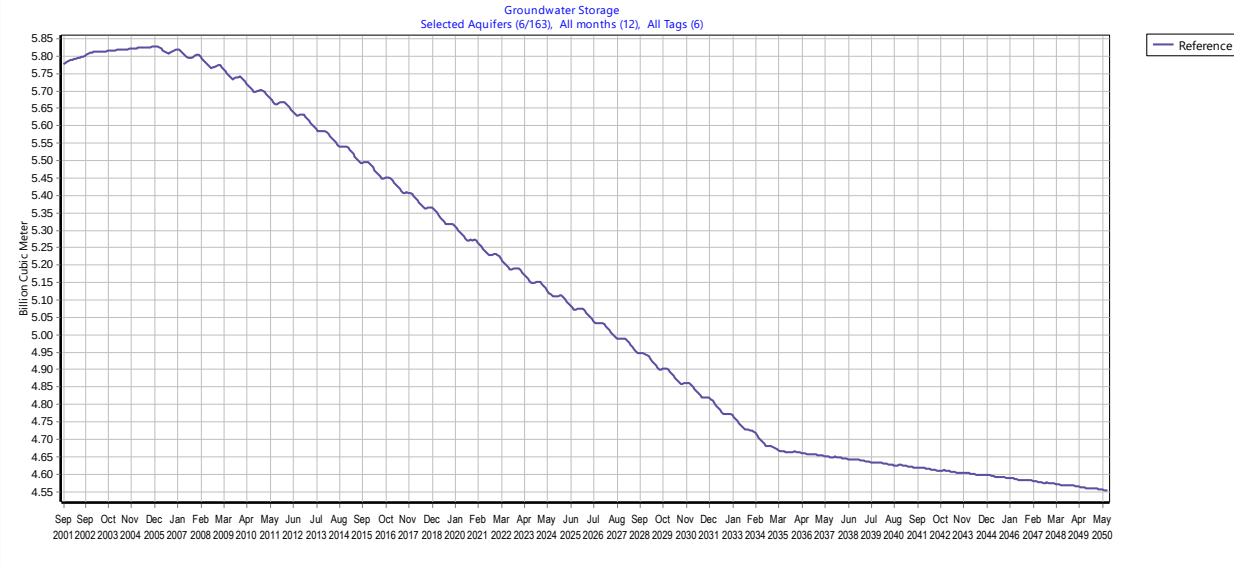


Figure 113 : Variation du stock dans le système aquifère Plaine de Kairouan

Source : STUDI Eau 2050

Nabeul

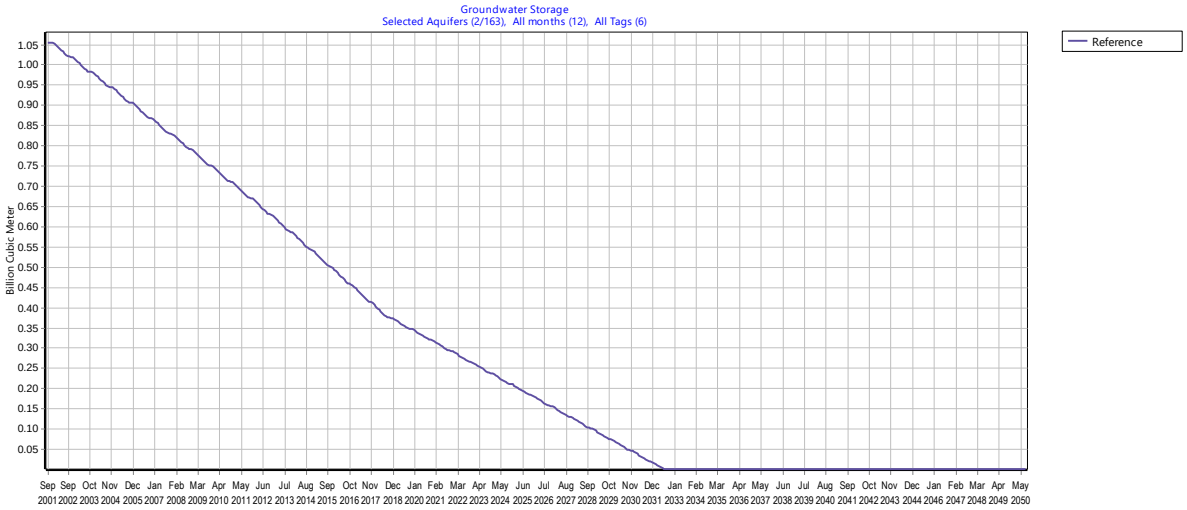


Figure 114 : Variation du stock dans le système aquifère Nabeul

Source : STUDI Eau 2050

2.3 GESTION ET VALORISATION PAR BASSIN VERSANT/AQUIFERE DE L'IRRIGATION

2.3.1 Méthode de simulation

Pour chaque scénario climatique et/ou agronomique, le modèle « Eau2050_Agri » estime les besoins en eau agricoles qui sont communiqués au modèle « Eau2050_Allocation ». Ce dernier, évalue les performances hydro-économiques du scénario étudié.

En plus du découpage administratif par Gouvernorat, l'activité agricole est schématisée par deux nœuds « Bassin versant » représentant les PPI et les PIP. En plus, le modèle considère un découpage spatial basé sur la répartition des PPI et les PIP en étages bioclimatiques (Pourcentage de surfaces). A l'intérieur de chaque étage bioclimatique, dix-neuf (19) cultures principales sont créées. Pour chaque Gouvernorat, le modèle « Eau2050_Agri » adopte le schéma conceptuel de la Figure 115.

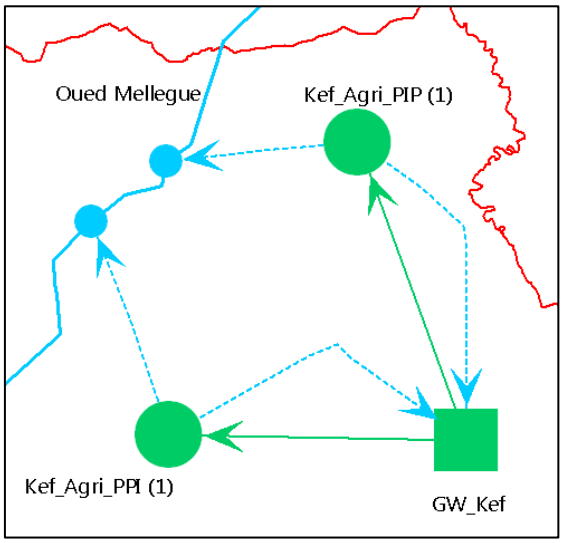


Figure 115 : Schéma conceptuel de modélisation des besoins en eau agricoles par Gouvernorat.

Source : STUDI Eau 2050

Les deux nœuds PPI et PIP renferment chacune les 19 branches de cultures, pour chaque étage bioclimatique, avec leurs données caractéristiques. La Figure 115 donne l'exemple du nœud Kef_Agri_PPI :

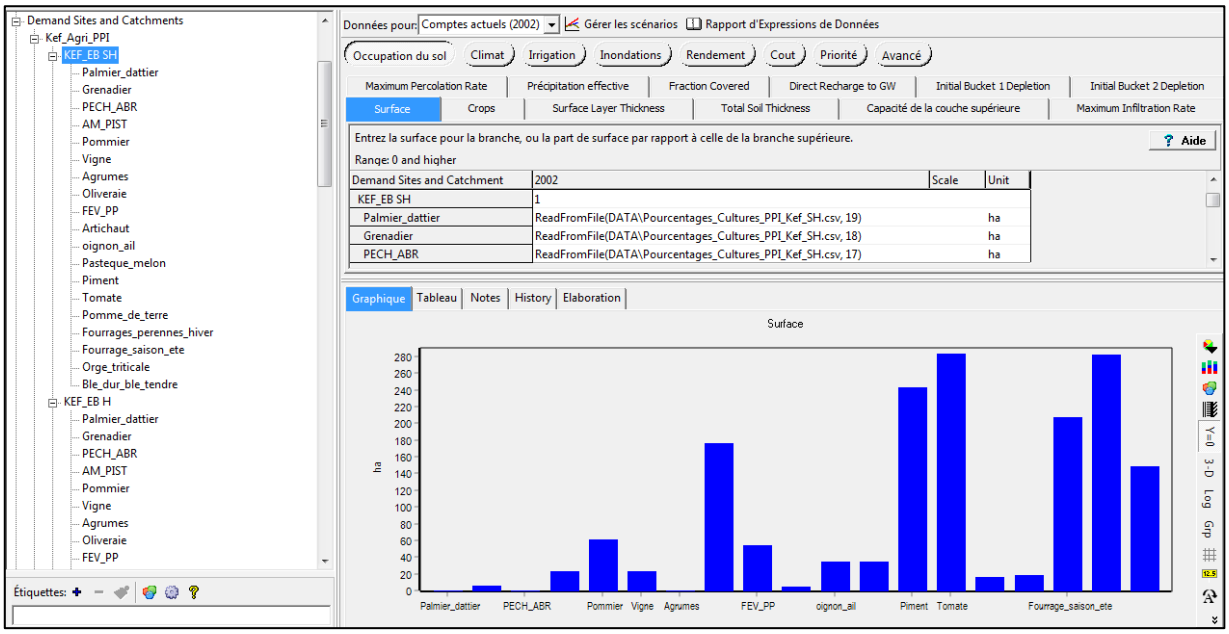


Figure 116 : Architecture des nœuds "Bassin versant" représentant les PPI du Gouvernorat du Kef.

Source : STUDI Eau 2050

Chacun des étages bioclimatiques est caractérisé par sa précipitation mensuelle, ainsi que par les températures (minimale et maximal) et les humidités de l'air (minimale et maximale). La Figure 117 donne l'exemple des données des précipitations de l'étage Sub-Humide.

Pour cette fin, l'équipe de modélisation a collecté, vérifié et organisé les données climatiques mensuelles des cinq étages bioclimatiques dans des fichiers au format « *.csv », pour la période 09/2002 – 08/2015 (156 pas de temps), soient 112 320 informations climatiques.

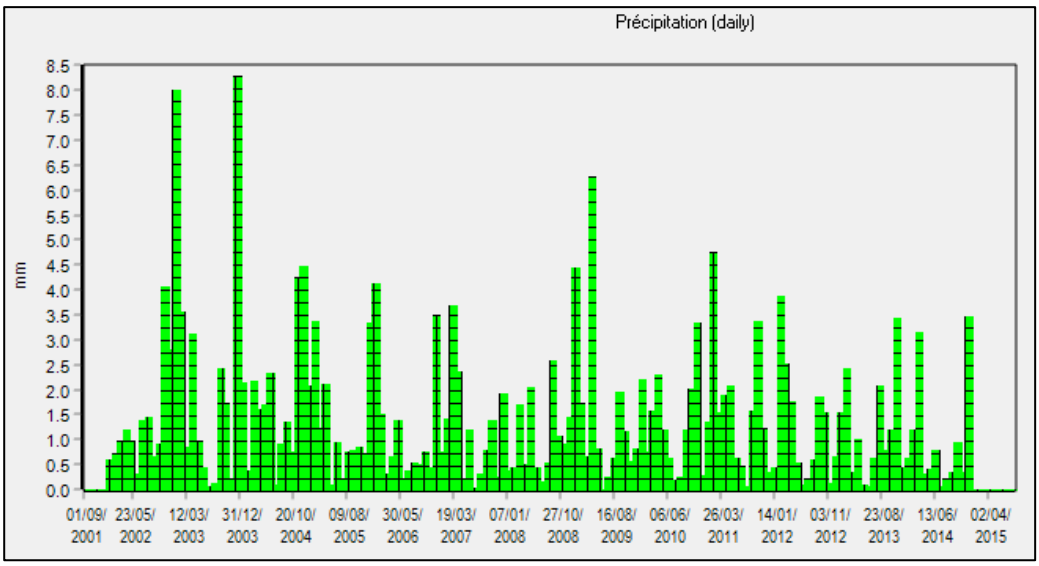


Figure 117 : Série chronologique de la précipitation de l'étage bioclimatique Sub-Humide de 2001 à 2015

Source : STUDI Eau 2050

Le modèle WEAP développé utilise ces informations pour estimer l'évapotranspiration de référence de l'étage bioclimatique, par la formule de Pannman modifiée (FAO 56)[41], telle que donné par l'équation suivante :

[41] Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M., 1998. Crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). FAO, Water Resources, Development and Management Service Rome, Italy.

$$ETo = \frac{0{,}408 \times \Delta \times (R_n - G) + \gamma \times \frac{900}{T+273} \times u_2 \times (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \times (1 + 0{,}34 \times u_2)} \quad (1)$$

Où :

ETo : Évapotranspiration de référence (mm/jour),

Rn : Rayonnement net à la surface du couvert végétal (MJ. m-²/jour),

G : Densité du flux de chaleur au sol (MJ. m-²/jour),

T : Température de l'air à 2 m de hauteur (°C),

u2 : Vitesse du vent à 2 m de hauteur (m/s),

es : Pression de vapeur saturante (kPa),

ea : Pression de vapeur actuelle (kPa),

Δ : Pente de la courbe de pression de vapeur (kPa/°C),

γ: Constante psychrométrique (KPa/°C)

Le besoin net d'une culture (ETc) est calculé dans les conditions standards (confort hydrique) pour chaque stade physiologique par l'équation :

$$ET_c = (K_{cb} + K_e) \times ETo \quad (2)$$

Avec Kcb : Coefficient cultural de base ; Ke : Représente l'évaporation à partir de la surface du sol.

En cas de manque d'eau dans la zone des racines des cultures, un stress hydrique s'installe et l'évapotranspiration actuelle (ETa) devient inférieure à ETc, estimée par l'équation suivante :

$$ET_a = (K_s \times K_{cb} \times K_e) \times ET_0 \quad (3)$$

La valeur de Ks prend des valeurs strictement inférieures à 1 si un stress hydrique s'installe et est estimée par WEAP par l'équation suivante :

$$K_s = \frac{TAW - D_r}{TAW - RAW} \quad (4)$$

Où TAW : La réserve en eau utile totale dans le sol de la zone des racines ; Dr : La chute de l'humidité du sol dans la zone des racines ; RAW : La réserve facilement utilisable dans la zone des racines.

WEAP offre la bibliothèque des cultures du bulletin FAO 56 avec toutes les données nécessaires pour l'estimation des besoins en eau théoriques et des rendements (valeurs des coefficients culturaux, durées des stades physiologiques, profondeurs des racines, etc…) (Figure 118).

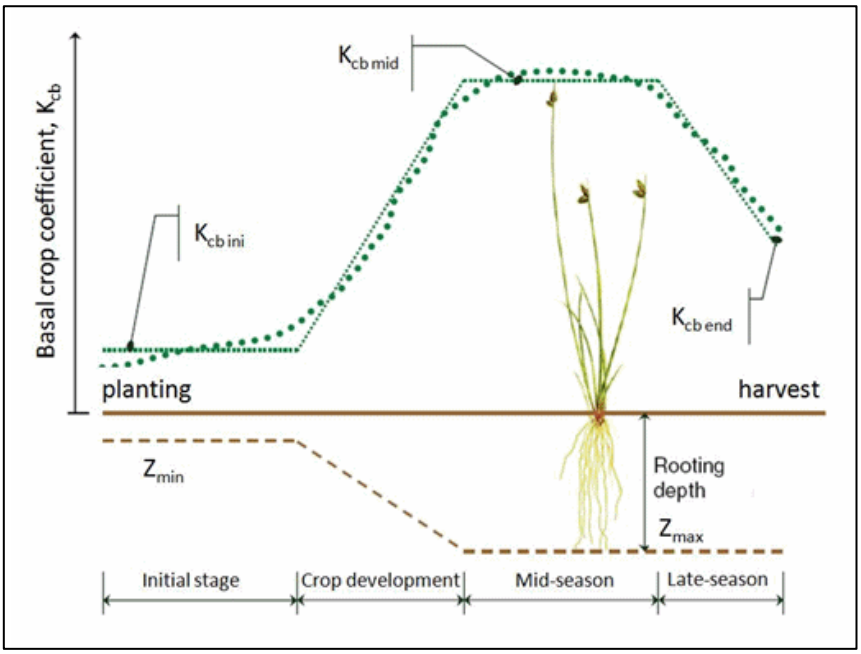
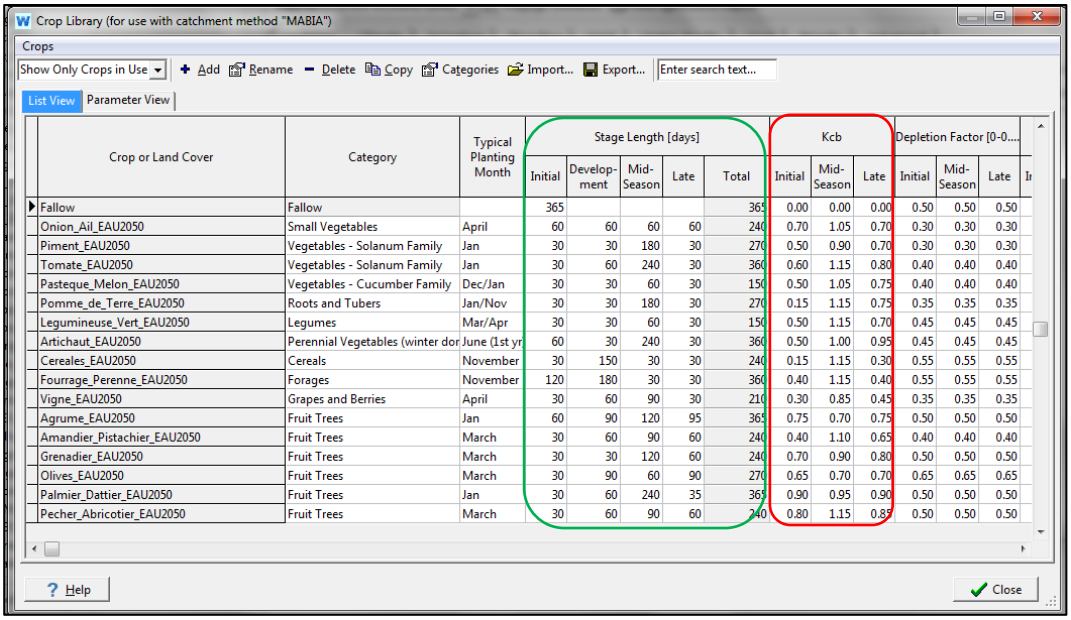


Figure 118 : Modulation du coefficient cultural des cultures et des durées des cycles physiologiques utilisés pour la modélisation des besoins en eau agricoles (Source : Aide de WEAP)

Source : STUDI Eau 2050

La bibliothèque de WEAP a été enrichie par 17 cultures, représentant les 19 classes de cultures retenues pour l'étude Eau 2050. En effet, la classe « Céréales_EAU2050 » représente le blé dur et le blé tendre, l'orge et le triticale et les fourrages de saison. L'équipe d'experts en irrigation a aussi introduit les durées des stades physiologiques de chaque culture (Cadre vert sur la Figure 120) ainsi que leurs coefficients culturaux (Cadre rouge sur la Figure 120), sur la base de publications scientifiques, d'études et d'enquêtes réalisées sur les cultures retenues en Tunisie.



Crop or Land Cover	Category	Typical Planting Month	Stage Length [days] Initial	Develop-ment	Mid-Season	Late	Total	Kcb Initial	Mid-Season	Late	Depletion Factor [0-0... Initial	Mid-Season	Late
Fallow	Fallow		365				365	0.00	0.00	0.00	0.50	0.50	0.50
Onion_Ail_EAU2050	Small Vegetables	April	60	60	60	60	240	0.70	1.05	0.70	0.30	0.30	0.30
Piment_EAU2050	Vegetables - Solanum Family	Jan	30	30	180	30	270	0.50	0.90	0.70	0.30	0.30	0.30
Tomate_EAU2050	Vegetables - Solanum Family	Jan	30	60	240	30	360	0.60	1.15	0.80	0.40	0.40	0.40
Pasteque_Melon_EAU2050	Vegetables - Cucumber Family	Dec/Jan	30	30	60	30	150	0.50	1.05	0.75	0.40	0.40	0.40
Pomme_de_Terre_EAU2050	Roots and Tubers	Jan/Nov	30	30	180	30	270	0.15	1.15	0.75	0.35	0.35	0.35
Legumineuse_Vert_EAU2050	Legumes	Mar/Apr	30	30	60	30	150	0.50	1.15	0.70	0.45	0.45	0.45
Artichaut_EAU2050	Perennial Vegetables (winter dor	June (1st yr	60	30	240	30	360	0.50	1.00	0.95	0.45	0.45	0.45
Cereales_EAU2050	Cereals	November	30	150	30	30	240	0.15	1.15	0.30	0.55	0.55	0.55
Fourrage_Perenne_EAU2050	Forages	November	120	180	30	30	360	0.40	1.15	0.40	0.55	0.55	0.55
Vigne_EAU2050	Grapes and Berries	April	30	60	90	30	210	0.30	0.85	0.45	0.35	0.35	0.35
Agrume_EAU2050	Fruit Trees	Jan	60	90	120	95	365	0.75	0.70	0.75	0.50	0.50	0.50
Amandier_Pistachier_EAU2050	Fruit Trees	March	30	60	90	60	240	0.40	1.10	0.65	0.40	0.40	0.40
Grenadier_EAU2050	Fruit Trees	March	30	30	120	60	240	0.70	0.90	0.80	0.50	0.50	0.50
Olives_EAU2050	Fruit Trees	March	30	90	60	90	270	0.65	0.70	0.70	0.65	0.65	0.65
Palmier_Dattier_EAU2050	Fruit Trees	Jan	30	60	240	35	365	0.90	0.95	0.90	0.50	0.50	0.50
Pecher_Abricotier_EAU2050	Fruit Trees	March	30	60	90	60	240	0.80	1.15	0.85	0.50	0.50	0.50

Figure 119 : Bibliothèque des cultures utilisée pour la modélisation des besoins en eau agricoles

Source : STUDI Eau 2050

L'approche de modélisation des besoins en eau des cultures permet aussi d'estimer les rendements et les productions des cultures en fonction des rendements maximaux et des conditions hydriques. Les rendements maximaux des 19 classes de cultures sont extraits de publications scientifiques et d'études techniques publiées.

Le modèle « Eau2050_Agri » considère aussi l'efficacité des précipitations et l'efficience de l'irrigation à la parcelle, pour dériver la demande en eau globale de chaque système irrigué.

Une foi la demande en eau modélisée, une ressource en eau est utilisée pour alimenter la zone irriguée via une liaison de transmission dont la capacité de transit est illimitée.

Pour représenter les processus de ruissellement des eaux de surface et d'infiltration/recharge des aquifères à partir des zones irriguées suite aux apports d'eau (pluie et irrigation) supérieurs respectivement aux capacités d'infiltration et de stockage des sols, il est utilisé deux objets « Ruissellement/Infiltration » : Un reliant le système irrigué à une rivière et un autre à un aquifère.

Ainsi, avec ce schéma conceptuel et la base de données utilisée, le modèle « Eau2050_Agri » est capable de simuler :

Les besoins en eau théoriques,
Les demandes en eau d'irrigation, y compris les pertes,
Les rendements des cultures.
Les volumes d'eau infiltrés aux aquifères,
Les volumes d'eau ruisselés aux rivières.

La Figure 81 est un exemple de sorties du modèle EAU2050_Agri, exprimant les demandes mensuelles en eau d'irrigation de tous les nœuds PPI et PIP du modèle :

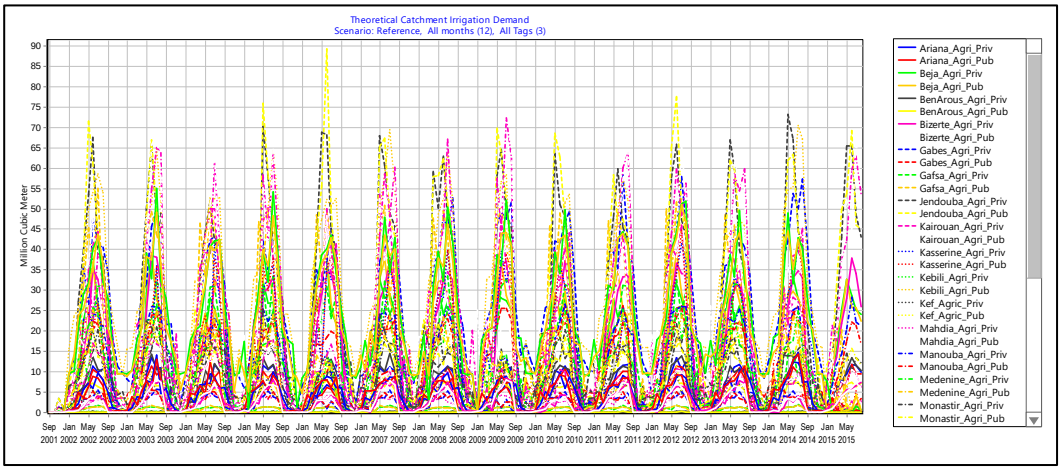


Figure 120 : Demandes en eau d'irrigation des nœuds PPI et PIP des 24 Gouvernorats de la Tunisie, de 2002 à 2015.

Source : STUDI Eau 2050

Ces résultats de modélisation des demandes en eau d'irrigation (7488 informations : 24x2x156) sont ensuite exportés au modèle « Eau2050_Allocation » (fichier « *.csv ») qui utilise la fonction WEAP « ReadFronFile » pour la lecture directe des données (Figure 121).

	A	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA
1	Theoretical Catchment Irrigation Demand (Cubic Meter)														
2	Levels, Branch: Demand Sites and Catchments, Levels: 1,														
3															
4		sept-02	oct-02	nov-02	déc-02	janv-03	févr-03	mars-03	avr-03	mai-03	juin-03	juil-03	août-03	sept-03	oct-03
5	Ariana_Agri_Priv	5491580	4148986	927112	457105	8583	0	4174021	3107520	9327825	13301226	10810284	10826031	602170	1643916
6	Ariana_Agri_Pub	0	0	0	0	489816	202684	3090872	3787115	8449543	11266907	9270179	10001678	0	0
7	Beja_Agri_Priv	11765222	6822868	685780	39917	0	0	3657986	8536837	29276702	37778368	28317866	23699559	8413110	3341011
8	Beja_Agri_Pub	291107	255314	1363121	0	235533	0	5374278	8790125	26567250	39545105	27556544	25507650	290138	258699
9	BenArous_Agri_Priv	5668916	2980564	1842611	83923	8316	0	4959475	4534231	10818474	14262515	10414412	10631128	850958	1613179
10	BenArous_Agri_Pub	0	0	0	53	1705853	544265	2293462	3292470	6294762	8064443	6547179	6465680	0	0
11	Bizerte_Agri_Priv	17288422	6982701	433313	0	0	0	6936394	11739565	25069236	38334011	37943284	31282366	8194214	8791698
12	Bizerte_Agri_Pub	26144	26853	34187	0	240107	0	3589471	6612714	14393598	22421053	22658189	18832537	0	52748
13	Gabes_Agri_Priv	34189609	18671808	11246335	9672155	8109877	6907839	18840120	29097618	31491018	45582541	49847484	42551098	21524700	21655991
14	Gabes_Agri_Pub	2577425	2635137	5242549	2843557	3868318	6179545	9968279	13939742	18053850	19659550	24604205	22723712	1281711	2475867
15	Gafsa_Agri_Priv	16676213	13506065	1429897	3473886	2261931	1639309	14232756	14530135	22528541	22751332	31895102	30326827	16666604	13418128
16	Gafsa_Agri_Pub	2217	2249	5424892	2762712	2684050	6152721	8814402	31360901	43109787	49294703	43632121	39789372	2204	2192
17	Jendouba_Agri_Priv	21718598	7805237	1098978	0	0	0	9214428	34434449	49929851	65302039	47349582	48791808	16209974	4482802
18	Jendouba_Agri_Pub	1650972	758528	2114007	0	37367	0	10101612	29869714	48462401	66776010	48551367	44401747	1140161	765788
19	Kairouan_Agri_Priv	19309581	4678054	3350908	3514798	287345	969969	21498104	23116611	41624851	39263728	48364118	44690247	9110700	14352439
20	Kairouan_Agri_Pub	519764	263240	2444729	3080220	421250	10274159	20030108	14732477	48275294	39528083	46986879	42749104	522761	264113
21	Kasserine_Agri_Priv	10648662	6209341	1070994	279620	565879	141324	3186216	18492394	18800505	15575486	35842273	16645455	16842363	11773444
22	Kasserine_Agri_Pub	0	0	1176979	504376	1209737	1180455	10958718	18014410	13202236	23516611	35642000	14578218	0	0
23	Kebili_Agri_Priv	86310	60215	30704	23566	28600	21873	68680	53608	110681	124424	132929	114354	77708	44755
24	Kebili_Agri_Pub	30339311	23642213	16367742	9378396	15521806	15875974	24620827	26641747	48814910	50938106	64817879	51641061	23794857	18216885
25	Kef_Agric_Priv	4192127	1704730	263174	69869	325	0	1516735	2125960	6762842	8796079	4613790	4451741	407316	1605095
26	Kef_Agric_Pub	1780	882	229622	112058	139122	0	2555918	3627397	7708977	9740419	4461947	3949846	0	0
27	Mahdia_Agri_Priv	1112979	469784	15240	231540	55132	0	1235136	1388026	3274782	4550475	4405699	3842875	461733	1080873
28	Mahdia_Agri_Pub	18393	85972	10359	7776	2268	6912	1226345	2281477	3468714	4350089	4721226	4347458	18643	86579

WEAP Export

Figure 121 : Structure du fichier « *.csv » des demandes en eau mensuelles exportées du modèle Eau2050_Agri au modèle Eau2050_Allocation

Source : STUDI Eau 2050

Pour toute la période d'étude (9/2002 – 8/2050 : 564 pas de temps), le modèle Eau2050_Agri produira 27 072 informations sur les demandes en eau d'irrigation, utilisées par le modèle d'allocation.

2.3.2 Résultats des simulations

Les besoins en eaux des PIP et des PPI à l'horizon 2050 simulés par le modèle sont récapitulées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 15 : Estimation des besoins en eaux des PPI et PIP à l'horizon 2050 (Mm3)

	PIP	PPI
Nord-Ouest	64	171
Nord-Est	246	307
Centre-Est	128	62
Centre-Ouest	728	168
Sud-Est	113	169
Sud-Ouest	112	494
Total	1391	1370

Source : STUDI EAU 2050

2.4 L'ALIMENTATION EN EAU POTABLE URBAINE ET RURALE

2.4.1 Liminaire

Dans les 30 prochaines années, le problème de l'eau continuera à se poser en Tunisie vu l'essor démographique et la hausse des niveaux de vie que va connaître notre pays. Les problèmes ne sont pas seulement quantitatifs, ils sont également qualitatifs puisque les ressources faciles d'accès seront à l'avenir de moins en moins potables (salinité, pollution, etc.).

Tous ces facteurs d'augmentation des « pénuries d'eau » ou de « stress hydrique » seront aggravés par les changements climatiques.

La Tunisie fait face aujourd'hui à une multiplicité d'enjeux et de défis :

Assurer l'allocation de l'eau entre des secteurs en concurrence croissante pour une ressource de plus en plus rare ;
Mettre en œuvre des stratégies d'augmentation de l'offre en eau potable aux coûts de production et de distribution de plus en plus élevé, compte tenu des contraintes techniques, environnementales, sociales (foncières, etc.), mais également économiques et financières croissantes ;
Gérer la demande en eau d'un très grand nombre d'usagers dans le milieu rural (usagers domestiques mais également des agriculteurs et des éleveurs qui se sont greffés ces dernières années sur le système AEP rural) ;

Par ailleurs, l'accès satisfaisant à l'eau potable saine de façon permanente doit rester aisé à travers l'ensemble du pays avec une gestion durable des ressources en eau.

Pour répondre à ces enjeux, des politiques devront être progressivement conduites en Tunisie. Des mécanismes à la fois réglementaires, de tarification et de restriction quantitative doivent être mis en place pour maitriser sinon limiter un quota d'eau par usager. Ceci parallèlement à des mécanismes d'incitation aux changements de pratiques et de comportement des usagers visant des économies d'eau ou un usage raisonné des ressources en eau.

2.4.2 Méthode de simulation

Les deux angles du problème de l'eau potable ; qualitatif et quantitatif doivent être examinés et traités dans cette étape de l'étude afin d'identifier des orientations socio-économiques, territoriales et environnementales pour la stratégie de « Eau 2050 ».

Les résultats attendus de cette étape de l'étude se veulent conformes aux TDRs, en particulier (i) les orientations stratégiques de l'AEP pour la satisfaction des différents secteurs (domestique, touristique, industriel) ; (ii) l'évolution de la demande en eau par gouvernorat et par milieu (urbain, rural) ; (iii) les solutions préconisées pour satisfaire la demande en eau ; (iv) les études prospectives multithématiques et l'établissement de modèles prévisionnels.

Rappel des définitions

Urbain : Communal tel que défini par l'institut National de la Statistique.

« Commune : c'est une partie du territoire bien délimitée érigée en tant que telle, par un décret qui la soumet à la loi municipale et est formée d'un ou plusieurs secteurs (*) urbains »,

(*) Secteur : le secteur est la plus petite division administrative selon laquelle est découpée le territoire national ; l'autorité en est le chef du secteur ou Omda, ce secteur peut être urbain ou rural[42].

Rural : non communal

Population Rural-SONEDE : Population branchée au réseau SONEDE plus population alimentée en eau par bornes fontaines (SONEDE) ou par potence[43].

Population Rural-GR : Population alimentée en eau par la DGGREE (Direction Générale du Génie Rural et de l'Exploitation des Eaux)

Les principaux paramètres caractérisant la situation de l'eau potable en Tunisie à l'horizon 2050 sont :

La démographie ;

La consommation spécifique ;

Le rendement du réseau ;

L'usage industriel ;

L'usage touristique.

2.4.3 Résultats des simulations

2.4.3.1 Projections démographiques à l'horizon 2050

Les forçages démographiques

De 1921 à 2014, la population tunisienne a quintuplé. Mais, à la faveur des efforts déployés en matière de planning familial, et également d'un ensemble de facteurs, dont en particulier la prise de conscience accrue de l'importance que revêtent les questions démographiques dans l'amélioration du niveau de vie, le renforcement de l'équilibre familial, la santé, la scolarité etc., on enregistre depuis l'indépendance une baisse notable du taux d'accroissement démographique.

[42] SONEDE : Rapport des statistiques 2018
[43] SONEDE : Rapport des statistiques 2018

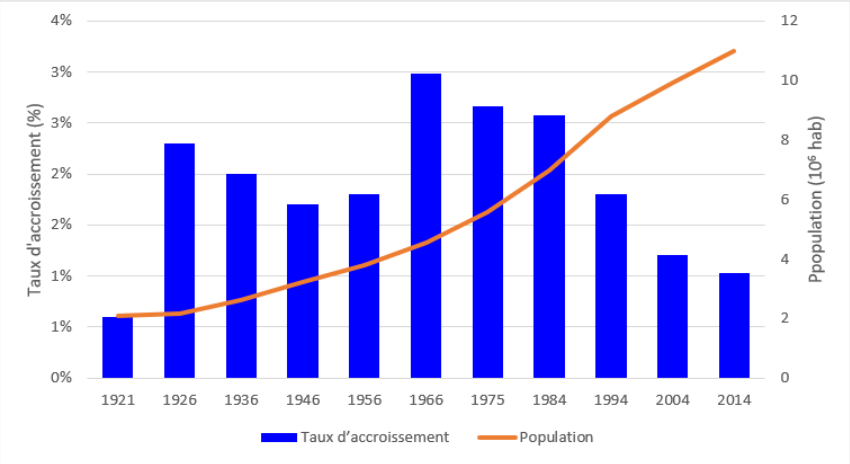


Figure 122 : Données de croissance démographiques

Source : INS, traitement STUDI

Les instances internationales compétentes qualifient les pays disposant de moins de 1000 m^3/habitant/an de pays en situation de stress hydrique. La Tunisie fait partie des pays dans cette situation (pour l'essentiel des pays de la région du Moyen Orient et de l'Afrique du Nord : MENA). En effet, les ressources réparties par tête d'habitant sont en dessous de ce seuil et diminuent inéluctablement d'année en année, sous le seul effet de la croissance démographique, pour n'être plus égales aujourd'hui qu'à 440 m^3/habitant/an. La maîtrise démographique est à préserver à l'avenir pour limiter le stress hydrique (Figure ci-dessous).

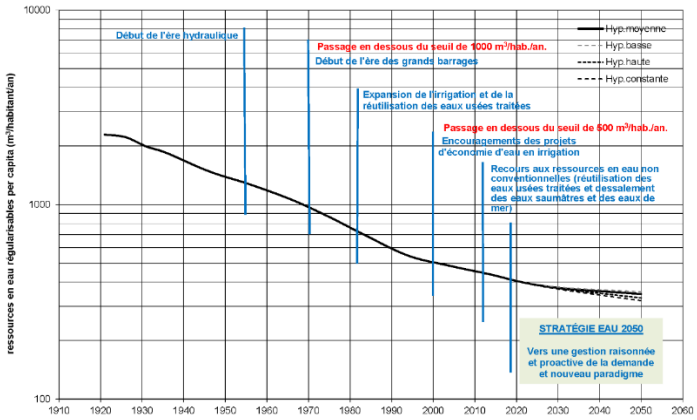


Figure 123 : Indice des ressources en eau per capita[44]

[44] Y.ZAHAR : Maîtrise de la croissance démographique, gestion économique de l'eau et sécurité alimentaire. Quelles perspectives d'adéquations futures en Tunisie ?. Science et Changements Planetaires - Secheresse 12(2):103-110

Les projections de la démographie seront implémentées dans le modèle jusqu'à l'horizon 2050. La figure ci-après présente un exemple de projection tendancielle des populations à l'Ariana (exemple).

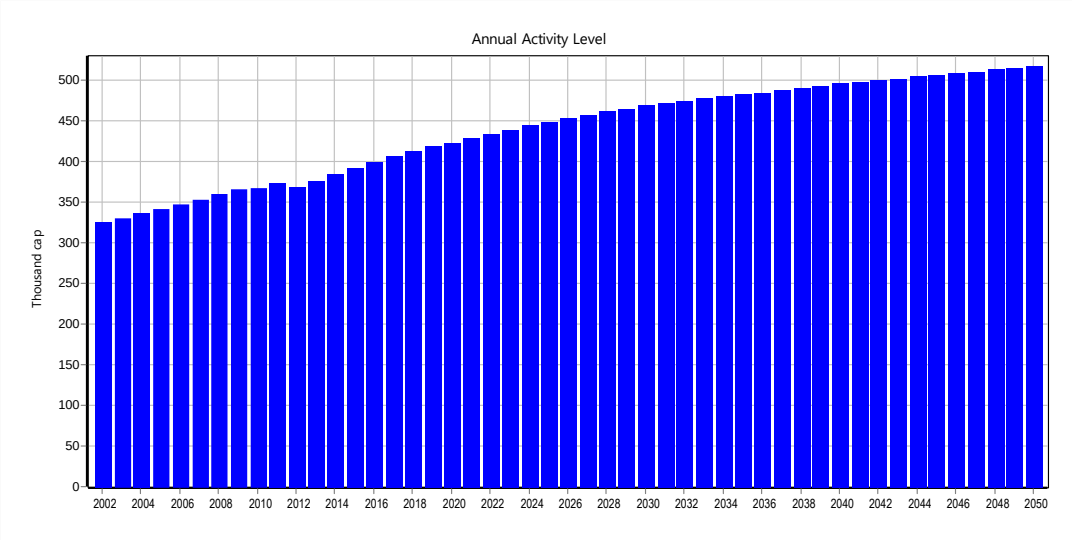


Figure 124: Projection de la population à l'Ariana jusqu'à 2050 tel qu'inséré dans le modèle STUDI Eau 2050

Source :STUDI Eau 2050

Les projections de l'INS de 2014

En dix ans, la population résidente en Tunisie a cru d'à peine 1,03% soit 1.071.854 habitants, passant ainsi de 9.910.900 habitants en 2004 à 10.982.754 en 2014 dont le quart réside dans le Grand Tunis (Tunis, Ariana, Manouba et Ben Arous). Il s'agit-là d'une tendance lourde, car le croît démographique était de 1,21% au cours de la décennie 1994-2004 et 2,35% dans les années 1984-1994. On observera également que pour la première fois en Tunisie, trois gouvernorats du N.O, à savoir Jendouba, Siliana et le Kef enregistrent un croît démographique négatif du fait de l'exode d'un grand nombre d'habitants de ces gouvernorats vers les régions les plus nanties en raison des problèmes sociaux et économiques auxquels ils sont confrontés.

L'estimation de l'INS de la population pour 2020

C'est une estimation qui a été établie pour le mois de janvier 2020 (11 708 370 habitants). L'estimation est menée à partir des données de l'état civil et des mouvements migratoires. Le total pour la Tunisie de l'estimation pour 2020 montre une différence d'environ 143 641 habitants de moins que la projection établie en 2015.

Traitement pour les projections Eau 2050

Pour la population totale entre 2020 et 2050, ce sont les projections de l'INS de 2014-2041 qui sont reprises en retenant les mêmes scénarios que l'INS (hypothèses constante, basse, moyenne et haute) (Annexe).
Les projections de l'INS entre 2014 et 2041 sont espacées par pas de 5 ans. L'extrapolation a été faite année par année jusqu'à 2050.
Cette extrapolation a été opérée pour la période 2020-2050 pour avoir les projections de la population par gouvernorat.

Tableau 16 : Projections de la population 2020-2050 par hypothèse

Hypothèse	2020	2025	2030	2040	2050	2050/2020
Basse	11 819 416	12 364 065	12 742 966	13 155 545	13 480 657	114,30%
Moyenne	11 852 011	12 440 878	12 862 531	13 379 599	13 835 171	117,10%
Haute	11 845 646	12 456 739	12 953 045	13 721 644	14 471 916	122,80%
Haute Bis	11 869 394	12 519 452	13 056 267	13 871 633	14 653 599	124,10%
Constante	11 856 729	12 500 399	13 053 672	13 997 445	14 965 284	127,10%

Source :INS traitement STUDI Eau 2050

La différence entre les projections des 5 hypothèses est relativement faible, voire marginale. L'hypothèse moyenne est retenue pour le scénario tendanciel.

Tableau 17 : Projections de la population par gouvernorat 2020-2050 : Hypothèse Moyenne

Gouvernorats	2020	2025	2030	2040	2050	2050/2020
Tunis	1 087 304	1 113 504	1 121 817	1 103 925	1 074 463	98,8%
Ariana	669 338	760 777	850 665	1 031 142	1 236 267	184,7%
Ben Arous	717 384	789 733	855 259	972 501	1 093 746	152,5%
Manouba	424 667	452 349	474 012	504 634	531 372	125,1%
Nabeul	869 663	924 422	966 672	1 024 835	1 074 640	123,6%
Zaghouan	191 125	200 803	207 546	214 959	220 207	115,2%
Bizerte	602 015	621 339	630 869	630 546	623 347	103,5%
Béja	311 306	309 458	302 626	280 589	257 318	82,7%
Jendouba	409 223	403 382	391 168	356 627	321 588	78,6%
Le Kef	249 892	246 592	239 385	218 719	197 657	79,1%
Siliana	230 625	228 155	222 046	203 904	185 201	80,3%
Sousse	750 797	819 664	880 315	984 465	1 088 922	145,0%
Monastir	608 760	658 271	700 249	768 255	833 667	136,9%
Mahdia	447 409	469 334	484 338	500 080	510 698	114,1%
Sfax	1 029 714	1 080 830	1 116 061	1 153 734	1 179 663	114,6%
Kairouan	601 972	615 548	619 209	607 499	589 505	97,9%
Kasserine	465 189	477 463	482 103	476 537	465 895	100,2%
Sidi Bouzid	459 623	477 160	487 322	492 807	492 914	107,2%
Gabès	406 827	424 644	436 044	445 756	450 711	110,8%
Medenine	521 891	546 704	563 397	580 091	590 761	113,2%

Tableau 17 : Projections de la population par gouvernorat 2020-2050 : Hypothèse Moyenne

Gouvernorats	2020	2025	2030	2040	2050	2050/2020
Tataouine	153 090	155 045	154 475	148 667	141 516	92,4%
Gafsa	356 805	363 392	364 091	354 352	341 110	95,6%
Tozeur	116 373	120 943	123 651	125 312	125 608	107,9%
Kebili	171 019	181 364	189 212	199 665	208 395	121,9%
Total	**11 852 011**	**12 440 878**	**12 862 531**	**13 379 599**	**13 835 171**	**117,1%**

Source : INS traitement STUDI

2.4.3.2 Projections de la population rurale par gouvernorat de 2020 à 2050

C'est une estimation de l'évolution de la part de la population non communale par gouvernorat de 2020 à 2050. L'estimation est effectuée à partir des parts par gouvernorat données dans le Recensement de 2014.

La notion de population non communale se réfère au statut administratif de l'espace territorial. En matière d'eau potable, la notion couramment utilisée est celle de milieu rural et non rural ou de milieu rural non aggloméré versus dispersé.

Il faut noter que les projections sur la population par milieu (communal ou non) sont non disponibles, à cause notamment de l'incertitude concernant la mobilité territoriale.

La démarche suivie a consisté à considérer qu'il y a à travers le temps (depuis 1966, date du premier recensement de la population), une évolution de la part de la population non communale dans la population totale du pays. Les données sont disponibles seulement à l'échelle nationale et par gouvernorat uniquement dans le RGPH de 2014.

Une extrapolation selon plusieurs hypothèses est effectuée pour l'horizon 2050 sur le taux de croissance de la part de la population non communale dans la population totale. Rappelons que ce taux est passé à l'échelle nationale de pratiquement 60% en 1966 à près de 32% en 2014.

Les hypothèses sur le taux moyen national sont appliquées sur les différents gouvernorats selon différentes hypothèses :

H1 : taux de croissance de la part du communal = celui de la période 2004-2014 = -1,0% : correspond à l'évolution récente qui dénote d'un ralentissement de l'expansion du milieu communal ;

H2 : taux de croissance de la part du communal = celui de la période 1966-2014 = -1,3% : C'est la tendance sur le très long terme ce qui correspond à une tendance lourde, connue dans le monde aussi ;

H3 : taux de croissance de la part du communal = celui de la période 1984-1994 = -1,9% : reflète une accélération de l'expansion remarquable du communal qui coïncide avec une période de changement de la politique économique.

H4 : taux de croissance de la part communale : H1 pour les régions du littoral et H3 pour les régions de l'intérieur : est une hypothèse qui peut traduire une politique de discrimination positive.

L'hypothèse H2 est retenue pour le scénario tendanciel.

Population rurale desservie par la SONEDE et par la DGGREE:

Des projets d'amélioration du taux de desserte en eau potable dans le milieu rural des gouvernorats de Bizerte, Béja et Jendouba ont été programmés par la SONEDE.

Les données présentées sur le site de la SONEDE (nombre d'habitants desservis et horizon) de ces trois projets ont été prises en compte dans les projections. Le milieu rural est desservi à hauteur de 94,2% (52,7% par la SONEDE et 41,5% par les services du Génie rural).

En milieu rural, les périmètres d'intervention des deux opérateurs ne sont pas définis clairement. Traditionnellement, la SONEDE prend en charge les agglomérations rurales d'une certaine taille et les hameaux situés à proximités de ses réseaux d'adduction. Le facteur limitant est la capacité de la SONEDE à supporter les coûts d'exploitation de l'AEP rurale, supérieurs à ceux en milieu urbain (dispersion de l'habitat, relief, etc.).

Les secteurs desservis par la DGGREE le sont soit par des bornes fontaines, soit par des branchements individuels et la gestion est confiée à des associations d'usagers, appelées GDA.

Dans 13 Gouvernorats sur les 24 que compte le pays, le taux de desserte en milieu rural dépasse les 97%. 65% de personnes non encore desservies se trouvent dans les Gouvernorats de Kairouan, Bizerte, Sidi Bouzid et Sfax. L'habitat rural dispersé, l'absence de ressources souterraines, le relief et les difficultés d'accès sont à l'origine de cette situation.

Pour la stratégie de la gestion de l'eau potable en milieu rural vers l'horizon 2050, on fait l'hypothèse que la population alimentée actuellement par les services GR sera prise en charge totalement par la SONEDE à partir de 2040 (croissance et concentration des populations en collectivités territoriales).

On fait également l'hypothèse que le service de l'alimentation de l'eau potable rurale sera assuré à l'échelle communal conformément :

Aux nouvelles dispositions constitutionnelles (décentralisation et création de conseils régionaux) ;

Le découpage du territoire en 350 communes avec une couverture intégrale du territoire tunisien (JORT) N° 43 du 27 mai 2016 ;

La Loi organique n° 2018-29 du 9 mai 2018, relative au code des collectivités locales.

Il est attendu par ces dispositions que l'ensemble des tunisiens seront considérés effectivement en milieu communal, quel que soit leur lieu de résidence à l'horizon 2050.

Tableau 18 : Projections de la population Rurale-SONEDE

Année / Régions	2020	2025	2030	2040	2050
Tunis	0	0	0	0	0
Ariana	65 146	69 066	72 839	79 647	82 899
Ben Arous	50 085	51 429	51 966	61 968	60 503
Manouba	79 861	79 346	77 578	84 513	77 256
Nabeul	154 247	154 924	152 146	227 631	207 218
Zaghouan	48 753	48 145	47 739	83 677	74 417
Bizerte	106 654	175 000	171 093	151 736	130 223
Beja	71 600	143 557	132 338	108 317	86 235
Jendouba	108 508	203 000	210 976	170 685	133 618
Le Kef	30 982	30 441	30 078	65 698	51 542
Siliana	51 351	48 567	45 126	81 095	63 944

Tableau 18 : Projections de la population Rurale-SONEDE

Année / Régions	2020	2025	2030	2040	2050
Kairouan	116 160	119 749	134 872	271 119	228 395
Kasserine	31 389	34 729	34 899	185 543	157 479
Sidi Bouzid	99 969	101 641	105 399	248 075	215 408
Sousse	104 203	106 111	106 331	129 161	124 027
Monastir	0	0	0	0	0
Mahdia	165 551	162 643	157 024	188 070	166 736
Sfax	221 195	218 505	215 570	299 708	266 033
Gafsa	29 745	28 257	26 415	63 765	53 288
Tozeur	29 719	28 860	27 560	25 947	22 579
Kebili	70 245	69 485	67 637	63 818	57 825
Gabes	91 639	91 319	89 574	91 873	80 645
Medenine	69 459	67 868	65 257	86 016	76 047
Tataouine	43 053	40 747	38 104	37 616	31 085

Source :INS traitement STUDI

Tableau 19 : Projections de la population Rurale-GR

Année / Régions	2020	2025	2030	2040	2050
Tunis	0	0	0	0	0
Ariana	2 471	2 619	2 733	0	0
Ben Arous	10 326	10 603	10 714	0	0
Manouba	14 129	14 038	13 726	0	0
Nabeul	95 775	94 960	92 650	0	0
Zaghouan	47 314	46 368	44 715	0	0
Bizerte	62 343	2 264	0	0	0
Beja	82 945	0	0	0	0
Jendouba	135 950	25 372	0	0	0
Le Kef	59 513	54 778	49 616	0	0
Siliana	66 137	61 029	55 418	0	0
Kairouan	185 370	176 805	165 945	0	0
Kasserine	198 256	189 804	178 814	0	0
Sidi Bouzid	178 889	173 227	165 068	0	0
Sousse	25 977	26 453	26 508	0	0
Monastir	0	0	0	0	0
Mahdia	55 252	54 062	52 054	0	0
Sfax	117 830	115 362	111 145	0	0

Tableau 19 : Projections de la population Rurale-GR

Année / Régions	2020	2025	2030	2040	2050
Gafsa	55 108	52 351	48 939	0	0
Tozeur	2 009	1 947	1 858	0	0
Kebili	1 994	1 972	1 920	0	0
Gabes	12 552	12 221	11 708	0	0
Medenine	31 195	30 859	29 864	0	0
Tataouine	7 596	7 175	6 670	0	0

Source : INS traitement STUDI

2.4.3.3 Projections de la population urbaine par gouvernorat de 2020 à 2050

Le tableau ci-après montre les projections de la population urbaine par rapport à la population national compte tenu également des hypothèses appliquées pour les projections de la population rurale.

Tableau 20 : Projections de la population Urbaine

Année / Régions	2020	2025	2030	2040	2050
Tunis	1 084 313	1 106 629	1 111 389	1 085 438	1 046 931
Ariana	598 539	682 972	766 486	933 490	1 120 923
Ben Arous	654 617	722 431	784 231	893 854	1 004 833
Manouba	329 362	356 026	378 160	411 539	440 380
Nabeul	611 118	664 741	709 891	779 264	839 177
Zaghouan	91 552	102 498	112 010	127 066	139 600
Bizerte	407 654	431 985	449 256	467 260	476 301
Beja	150 716	159 438	164 673	166 949	163 992
Jendouba	146 632	160 489	170 020	178 238	178 373
Le Kef	148 987	152 826	153 608	148 684	140 521
Siliana	107 592	113 801	117 422	118 604	115 889
Kairouan	241 603	269 609	292 328	323 403	343 642
Kasserine	222 075	242 990	259 502	281 102	294 855
Sidi Bouzid	149 645	175 272	197 929	234 091	262 802
Sousse	618 153	681 632	738 886	838 421	936 612
Monastir	607 086	654 206	693 740	755 390	812 305
Mahdia	222 461	247 536	269 065	302 494	329 863
Sfax	669 796	724 548	768 858	831 671	880 708
Gafsa	270 749	280 329	285 154	284 486	278 942
Tozeur	84 041	89 164	92 899	97 129	99 692
Kebili	98 205	108 684	117 796	132 411	145 147

Tableau 20 : Projections de la population Urbaine

Année / Régions	2020	2025	2030	2040	2050
Gabes	294 048	313 309	327 835	345 716	357 901
Medenine	417 918	443 139	461 826	484 137	499 378
Tataouine	101 320	105 580	107 946	108 445	709

Source : INS traitement STUDI

2.4.3.4 Projections des *consommations* spécifiques à l'horizon 2050

Des échanges avec la SONEDE ont eu lieu régulièrement durant cette étape de l'étude pour la concertation et l'échange nécessaire afin de définir des hypothèses de projections des consommations spécifiques domestiques et des rendements du réseau.

Les hypothèses retenues sont les suivantes :

Tableau 21 : Hypothèses de projections des consommations spécifiques domestiques et des rendements du réseau

Hypothèse de base :

Année	2018	2020	2025	2030	2040	2050
Cs	98,6	100	102	104	107	110

Hypothèse optimiste

Année	2018	2020	2025	2030	2040	2050
Cs	98,6	100	100	100	100	100

Hypothèse pessimiste

Année	2018	2020	2025	2030	2040	2050
Cs	98,6	100	105	110	120	130

Source : SONEDE

L'hypothèse de base est utilisée dans le modèle pour le scénario tendanciel.

2.4.3.5 Consommation spécifique urbaine et consommation spécifique rurale-SONEDE

La SONEDE intervient en milieu urbain ainsi qu'en milieu rural regroupé et limitrophe à son réseau de distribution selon la même approche appliquée en milieu urbain.

La consommation spécifique calculée est la somme de la consommation spécifique pour l'usage domestique et l'usage collectif.
La consommation spécifique pour l'usage collectif observée durant les 15 dernières années varie entre 14 et 13 l/j/hab. La valeur de 13 l/j/hab. est retenue dans le modèle pour le scénario tendanciel.

Le tableau ci-après présente les valeurs retenues pour les consommations spécifiques urbaines et rurales-SONEDE par gouvernorat.

Tableau 22 : Projections des consommations spécifiques urbaines par gouvernorat (l/j/hab)

Gouvernorats	2020	2025	2030	2040	2050
Tunis	113	115	117	120	123
Ariana	113	115	117	120	123
Ben Arous	113	115	117	120	123
Manouba	113	115	117	120	123
Nabeul	113	115	117	120	123
Zaghouan	113	115	117	120	123
Bizerte	113	115	117	120	123
Béja	113	115	117	120	123
Jendouba	113	115	117	120	123
Le Kef	113	115	117	120	123
Siliana	113	115	117	120	123
Sousse	113	115	117	120	123
Monastir	113	115	117	120	123
Mahdia	113	115	117	120	123
Sfax	113	115	117	120	123
Kairouan	113	115	117	120	123
Kasserine	113	115	117	120	123
Sidi Bouzid	113	115	117	120	123
Gabès	113	115	117	120	123
Medenine	113	115	117	120	123
Tataouine	113	115	117	120	123
Gafsa	113	115	117	120	123
Tozeur	113	115	117	120	123
Kebili	113	115	117	120	123

Tableau 23 : Projections des consommations spécifiques rurales-SONEDE par gouvernorat (l/j/hab)

Gouvernorats	2020	2025	2030	2040	2050
Tunis	-	-	-	-	-
Ariana	113	115	117	120	123
Ben Arous	113	115	117	120	123
Manouba	113	115	117	120	123
Nabeul	113	115	117	120	123
Zaghouan	113	115	117	120	123
Bizerte	113	115	117	120	123
Béja	113	115	117	120	123
Jendouba	113	115	117	120	123
Le Kef	113	115	117	120	123
Siliana	113	115	117	120	123
Sousse	113	115	117	120	123
Monastir	-	-	-	-	-
Mahdia	113	115	117	120	123
Sfax	113	115	117	120	123
Kairouan	113	115	117	120	123
Kasserine	113	115	117	120	123
Sidi Bouzid	113	115	117	120	123
Gabès	113	115	117	120	123
Medenine	113	115	117	120	123
Tataouine	113	115	117	120	123
Gafsa	113	115	117	120	123
Tozeur	113	115	117	120	123
Kebili	113	115	117	120	123

Source :SONEDE

2.4.3.6 Consommation spécifique rurale-GR

La DGGREE intervient en milieu rural dispersé grâce aux Arrondissements du Génie Rural dans les CRDA.

La consommation spécifique de la population rurale desservie par la DGGREE a enregistré une augmentation significative durant les 15 dernières années.
Les hypothèses utilisées pour les projections de la consommation spécifique rurale-GR sont les suivantes :

Prévoir une cible pour 2040 et 2050 par Benchmarking et compte tenu du contexte socio-urbain en Tunisie (90 l/j/hab.) ;
Projeter l'évolution de la consommation spécifique entre 2018 et 2040.

Le tableau ci-après présente les valeurs retenues pour la consommation spécifique rurale-GR par gouvernorat.

Tableau 24 : Projections de la consommation spécifique rurale-GR par gouvernorat (l/j/hab.)

Gouvernorats	2020	2025	2030	2040	2050
Tunis	-	-	-	-	-
Ariana	75	77	80	85	90
Ben Arous	75	77	80	85	90
Manouba	75	77	80	85	90
Nabeul	75	77	80	85	90
Zaghouan	75	77	80	85	90
Bizerte	75	77	80	85	90
Béja	75	77	80	85	90
Jendouba	75	77	80	85	90
Le Kef	75	77	80	85	90
Siliana	75	77	80	85	90
Sousse	75	77	80	85	90
Monastir	-	-	-	-	-
Mahdia	75	77	80	85	90
Sfax	75	77	80	85	90
Kairouan	75	77	80	85	90
Kasserine	75	77	80	85	90
Sidi Bouzid	75	77	80	85	90
Gabès	75	77	80	85	90
Medenine	75	77	80	85	90
Tataouine	75	77	80	85	90
Gafsa	75	77	80	85	90
Tozeur	75	77	80	85	90
Kebili	75	77	80	85	90

Source : SONEDE

2.4.3.7 Projections des rendements des réseaux à l'horizon 2050

Après la phase « Développement » de la fin du siècle dernier qui a conduit aux niveaux exceptionnels d'accès à l'eau et de qualité de service, les indicateurs de performance se sont recentrés naturellement sur les pertes d'eau et le gaspillage de la ressource.

La partie la plus vulnérable d'un système d'eau potable est la distribution, parce qu'elle implique aussi bien les moyens de l'opérateur que les usagers eux-mêmes.

Tableau 25 : volumes d'eau produits et distribués en 2018

PRODUCTION D'EAU	**Millions de m³**	**%**
Volume prélevé dans le milieu naturel	725,3	100
Services et pertes inévitables	13,1	1,8
Livraison aux AIC d'El Hamma	2,6	0,4
Pertes sur adduction et transferts	84,2	11,6
Volume introduit dans les réseaux de distribution	625,4	86,2
DISTRIBUTION D'EAU	**Millions de m³**	**%**
Volume introduit dans les réseaux de distribution	625,4	100,0
Volume consommé facturé	461,6	73,8
Volume consommé non facturé	13,9	2,2
Pertes totales	149,8	24,0
Dont pertes apparentes	25,0	4,0
Et pertes réelles	124,8	20,0
Indice linéaire de pertes	7,6 m³/jour/km	

Source : SONEDE

Le rendement moyen des réseaux de distribution (rapport du volume consommé au volume injecté en tête des réseaux de distribution) a reculé de 7 points en 10 ans, pour se positionner au niveau de 76% en 2018.

Tableau 26 : Indicateurs d'évolution des rendements de distribution de l'eau potable

Année	**2000**	**2006**	**2008**	**2018**	**Evolution (%/an)**
Rendement distribution (%)	86	84	83,1	76	-0,7%
Indice linéaire pertes m³/j/km	4,6	5,2	5,6	7,6	2,8%
Indice Structurel des fuites (ISF)	NA	NA	2,1	3,65	5,7

Source : SONEDE

En 2000, et selon les chiffres publiés par la SONEDE, « les indicateurs de rendement étaient proches de l'excellence ». Depuis, la dégradation est régulière et suscite des inquiétudes.

Historiquement, Il était admis par expérience qu'un indice linéaire des pertes de moins de 4 m3/jour/km caractérise les réseaux de distribution performants. Il correspond à un pourcentage de pertes réelles de 10,5%.

Comme les pertes d'eau dépendent de plusieurs facteurs (densité du réseau, volume consommé, pression de service, etc.) et pour rendre les choses comparables d'un système à un autre, l'Association Internationale de l'Eau (AIE) a proposé un modèle statistique pour estimer le niveau minimum des pertes réelles techniquement inévitables pour un système de distribution donné, et a défini l'indicateur « Indice

structurel des fuites » qui est le rapport des pertes réelles aux pertes inévitables. Ces pertes inévitables sont estimées en 2018 à 34,2 Mm3, représentant 27,4% des pertes réelles équivalant à un indice linéaire des pertes sur distribution de 2,1 m3/jour/km. On peut en conclure qu'il est économiquement non rentable d'investir pour réduire les pertes, à partir d'un rendement de 90%.

Après concertations avec la SONEDE, les hypothèses suivantes ont été recommandées :

Tableau 27 : Hypothèses de projections des rendements du réseau

Hypothèse de base :

Année	2018	2020	2025	2030	2040	2050
Rg %	69,5	70	72	73	74	75
Rd %	76	76	77	78	78,5	79

Hypothèse optimiste

Année	2018	2020	2025	2030	2040	2050
Rg %	69,5	70	72	74	76	78
Rd %	76	76	77	79	80	81

Hypothèse pessimiste

Année	2018	2020	2025	2030	2040	2050
Rg %	69,5	70	70	70	70	70
Rd %	76	76	76	76	76	76

Source : SONEDE

Avec :

Rg : Rendement global

Rd : Rendement sur la distribution

L'hypothèse de base est utilisée dans le modèle pour le scénario tendanciel.

Le tableau ci-après présente les valeurs retenues pour les rendements des réseaux par gouvernorat.

Tableau 28 : Projections des rendements des réseaux par gouvernorat (%)

Gouvernorats	**2020**	**2025**	**2030**	**2040**	**2050**
Tunis	76	77	78	78.5	79
Ariana	76	77	78	78.5	79
Ben Arous	76	77	78	78.5	79
Manouba	76	77	78	78.5	79
Nabeul	76	77	78	78.5	79
Zaghouan	76	77	78	78.5	79
Bizerte	76	77	78	78.5	79

Tableau 28 : Projections des rendements des réseaux par gouvernorat (%)

Gouvernorats	2020	2025	2030	2040	2050
Béja	76	77	78	78.5	79
Jendouba	76	77	78	78.5	79
Le Kef	76	77	78	78.5	79
Siliana	76	77	78	78.5	79
Sousse	76	77	78	78.5	79
Monastir	76	77	78	78.5	79
Mahdia	76	77	78	78.5	79
Sfax	76	77	78	78.5	79
Kairouan	76	77	78	78.5	79
Kasserine	76	77	78	78.5	79
Sidi Bouzid	76	77	78	78.5	79
Gabès	76	77	78	78.5	79
Medenine	76	77	78	78.5	79
Tataouine	76	77	78	78.5	79
Gafsa	76	77	78	78.5	79
Tozeur	76	77	78	78.5	79
Kebili	76	77	78	78.5	79

Source : SONEDE

2.4.3.8 Projections de la consommation industrielle

Les volumes consommés à usage industriel et touristique n'ont pas connu d'évolution marquante entre 2002 et 2018 sauf pour les années 2011 et 2015 où la consommation touristique a connu une baisse respectivement de 24,6 % et 20,6 % suite à la situation sociale et aux évènements de 2015.

On a fait les hypothèses suivantes pour les projections de la consommation industrielle au niveau du modèle développé :

Que les industries existantes reprendront une activité en croissance à partir de 2025 ;
A partir de l'horizon 2025, les volumes d'eau estimés seront les maximas des consommations observées entre 2002 et 2018 pour chaque gouvernorat ;
Entre 2025 et 2050, un taux annuel d'accroissement de 1.9% sera appliqué pour tous les gouvernorats. Ce taux est calculé pour la consommation industrielle nationale entre 2006 et 2010.

Tableau 29 : Projections de la consommation industrielle (10^3m3)

Année	2020	2025	2030	2040	2050
Jendouba	251	320	352	424	512
Le Kef	98	105	116	139	168
Siliana	97	104	114	138	167
Beja	506	891	979	1 181	1426
Zaghouan	1 226	1 240	1 362	1 645	1 985
Mahdia	901	1 138	1 251	1 510	1 823
Kairouan	161	192	211	255	308
Kasserine	145	245	269	325	392
Gafsa	73	214	235	284	343
Tozeur	51	51	56	68	82
Sidi Bouzid	81	266	293	353	427
Gabes	920	8 584	9 431	11 384	13 742
Kebili	31	31	34	41	49
Tataouine	28	73	80	97	117
Ariana	372	559	614	741	895
Manouba	992	1 307	1 436	1 733	2 092
Medenine	196	331	364	439	530
Tunis	2 648	3 317	3 644	4 399	5 310
Ben arous	3 277	4 595	5 048	6 094	7 355
Bizerte	1 265	2 147	2 359	2 847	3 437
Nabeul	2 706	3 002	3 299	3 982	4 807
Sousse	1 322	2 055	2 258	2 726	3 290
Monastir	3 008	3 501	3 847	4 644	5 605
Sfax	2 063	3 738	4 107	4 957	4 984

Source :STUDI Eau 2050

2.4.3.9 Projections de la *consommation* touristique

Le tourisme tunisien a connu, durant ces 10 dernières années, une grande variabilité de l'affluence des touristes dans un contexte international et national incertain. Ceci, d'autant plus avec la pandémie du COVID-19.

A cet effet, la projection de la consommation en eau potable pour l'usage touristique repose sur la base de données de la SONEDE durant les 5 dernières années pré-révolution, où la Tunisie a enregistré une importante croissance au niveau du tourisme.

La capacité annuelle en lits pour l'ensemble du pays pour cette période est constante aux alentours de 240 000 lits avec un taux d'occupation sensiblement proche de 55 %[45].

[45] http://www.ins.tn/fr/themes/nuit%C3%A9es-touristiques-et-h%C3%A9bergement

Pour les projections de la consommation touristique, on a adopté les hypothèses suivantes :

La consommation touristique annuelle entre 2020 et 2050 par gouvernorat est la moyenne des consommations annuelles enregistrées entre 2006 et 2010 ;
Le passage aux consommations mensuelles se fait selon les régions :
Les gouvernorats côtiers présentent une consommation élevée en mois de Juillet et Août ;
Les gouvernorats sahariens consomment plus d'eau en mois de Mars et Décembre ;
Les autres gouvernorats avec un tourisme faible (local, événementiel, affaire, etc.), la consommation est répartie d'une manière égale durant toute l'année (faible sensibilité saisonnière).

Tableau 30 : Projections de la consommation touristique (10^3 m3)

Année	2020	2025	2030	2040	2050
Jendouba	348	348	348	348	348
Le Kef	12	12	12	12	12
Siliana	1	1	1	1	1
Beja	10	10	10	10	10
Zaghouan	0	0	0	0	0
Mahdia	846	846	846	846	846
Kairouan	34	34	34	34	34
Kasserine	21	21	21	21	21
Gafsa	29	29	29	29	29
Tozeur	280	280	280	280	280
Sidi Bouzid	0	0	0	0	0
Gabes	79	79	79	79	79
Kebili	66	66	66	66	66
Tataouine	52	52	52	52	52
Ariana	0	0	0	0	0
Manouba	0	0	0	0	0
Medenine	5 018	5 018	5 018	5 018	5 018
Tunis	1 409	1 409	1 409	1 409	1 409
Ben arous	329	329	329	329	329
Bizerte	154	154	154	154	154
Nabeul	4 172	4 172	4 172	4 172	4 172
Sousse	2 902	2 902	2 902	2 902	2 902
Monastir	2 180	2 180	2 180	2 180	2 180
Sfax	199	199	199	199	199

Source : STUDI Eau 2050

2.4.4 Benchmarking

2.4.4.1 Consommation spécifique

Selon l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) :

Pour vivre décemment : 50 litres d'eau par jour et par personne ;
Pour un réel confort : à partir de 100 litres par personne et par jour.

Tous les pays développés se situent bien au-dessus de ces seuils.

En termes de consommation spécifique, celle-ci a atteint en 2018 la valeur de 121 l/j/hab. jugée suffisante pour un réel confort par l'OMS. Ce niveau nous classe dans le groupe des pays comme l'Allemagne, les Pays-Bas, la Belgique, la Hongrie, la Bulgarie ou la Pologne.

Selon Eurostat, Ifen et le Conseil mondial de l'eau, la consommation d'eau domestique par pays (en L/j/hab.) est la suivante :

Canada, Etats-Unis, Japon, Australie, Suisse : supérieur à 250 L/j/hab. ;
Finlande, Italie, Espagne, Portugal, Corée du sud, Grèce, Suède : de 160 à 250 L/j/hab. ;
Danemark, Royaume-Uni, Autriche, France, Luxembourg, Irlande : de 130 à 160 L/j/hab. ;
Allemagne, Pays-Bas, Hongrie, Bulgarie, Pologne, République Tchèque : inférieur à 130 L/j/hab. ;
Asie et Amérique Latine : de 50 à 100 L/j/hab. ;
Afrique Sub-Saharienne : de 10 à 20 L/j/hab.

La figure suivante présente la consommation spécifique par pays.

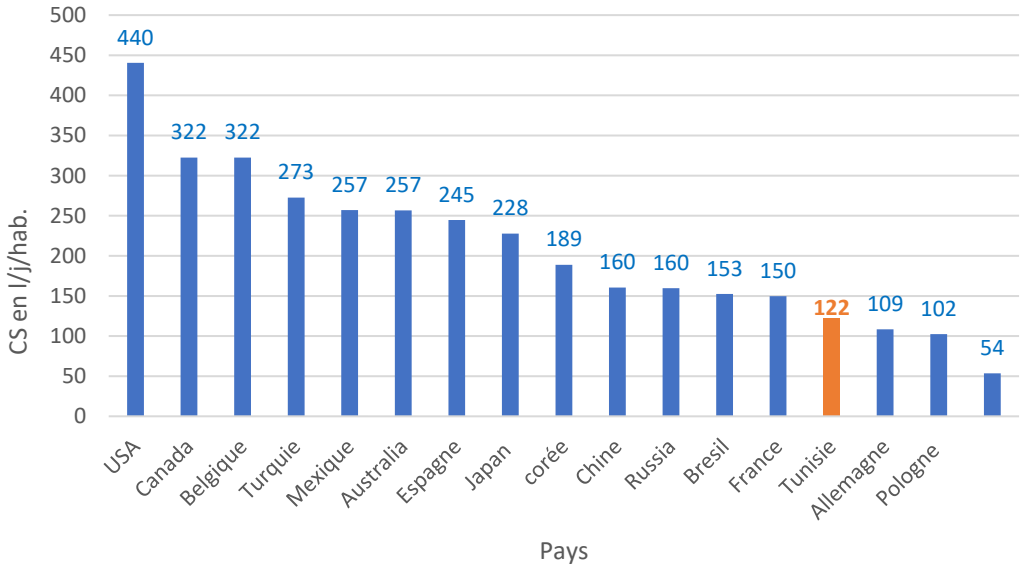


Figure 125: Benchmarking de la consommation spécifique

Source : Statista, 2020

La consommation spécifique projetée tendanciellement en 2050 tel que présentée dans la figure suivante.

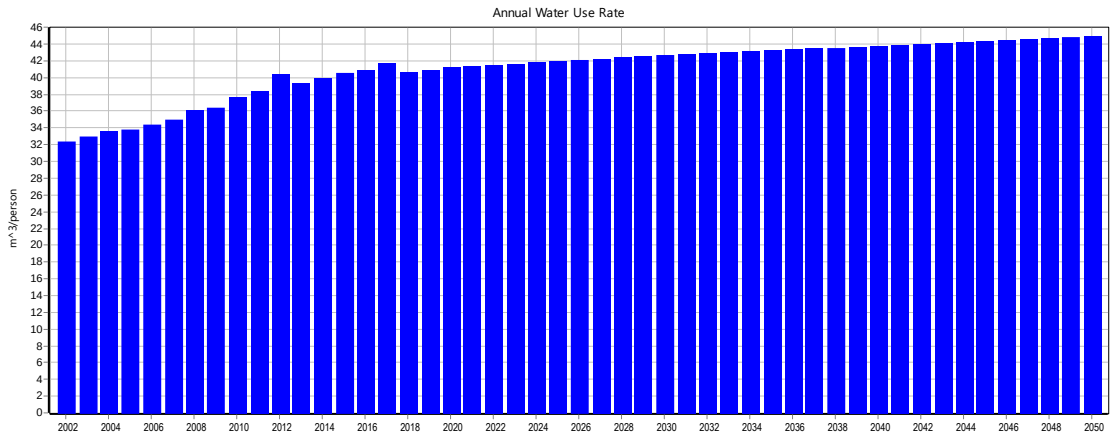


Figure 126 : Consommation spécifique dynamique du réseau EP tel qu'implémenté dans le modèle jusqu'à 2050

Source : STUDI Eau 2050

2.4.4.2 Rendement du réseau

L'efficience du réseau d'eau potable, son entretien et l'amélioration de son fonctionnement dans le temps sont parmi les indicateurs de performance pour le secteur de l'alimentation en eau potable dans un pays.

Une étude stratégique méditerranéenne pour le développement durable et l'efficience d'utilisation de l'eau dans cette région a été lancée en 2008 visant à approfondir la collecte de données élémentaires nécessaires au calcul de l'indice de l'efficience de l'eau.
Cette étude a classé en 2005 la Tunisie dans la catégorie 1 : Efficience élevée (peu de perte). Aujourd'hui, le rendement des réseaux de distribution en Tunisie atteint 76.1% avec une baisse de 9 points (85% en 2004).
Le tableau ci-après présente le rendement des réseaux de distribution par pays :

Tableau 31 : Benchmarking du rendement du réseau

	Tunisie[46](2019)	**Maroc[47](2018)**	**France[48](2019)**
Linéaire des réseaux de distribution	45 961 km	50 500 km	996 000 km (2013)
Nombre abonnés	2,980 millions	2,183 millions	27,6 millions (2013)
Volume produit	729,9 m3	1140 millions m3	5,5 milliards m3 (2015)
Rendement des rés eaux de distribution	76,1%	75,1%	80% à 90% (38 dep, 40%)
			75 à 80 (30 dep, 32%)
			70 à 75 (19 dep, 20%)
			50 à 70 (07 dep, 7%)

Source : STUDI Eau 2050

Les rendements des réseaux EP sont projetés tendanciellement jusqu'à 2050 et ils sont implémentés dans le modèle tel qu'indiquée sur le graphique ci-dessous :

[46] SONEDE : Société Nationale d'Exploitation et de Distribution des Eaux
[47] http://www.onep.ma/plaquettes/Plaquette-institutionnelle-ONEE-2019.pdf
[48] http://www.services.eaufrance.fr/panorama/cartes/2017/eau-potable

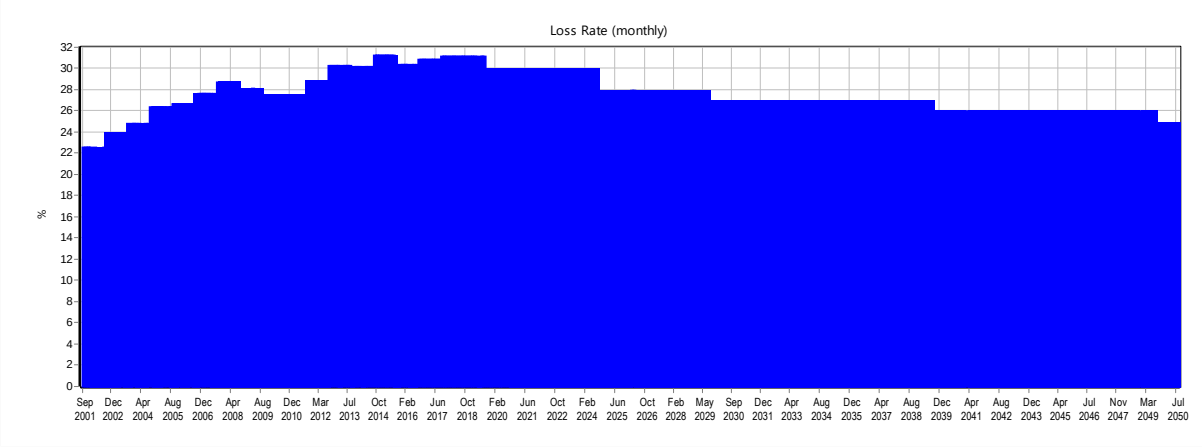


Figure 127 : Rendement dynamique du réseau EP tel qu'implémenté dans le modèle jusqu'à 2050

Source : STUDI Eau 2050

2.4.4.3 Tarification

Sans investissements nécessaires pour le renouvellement des réseaux, le remplacement des compteurs vétustes, etc.) le rendement actuel déjà relativement faible risque de se dégrader d'année en année. Or les équilibres financiers de la SONEDE ne sont plus assurés depuis près de 10 ans à cause d'une tarification quasi figée à un niveau inférieur au coût moyen. Avec pour conséquences :

La réduction des dépenses de renouvellement et d'entretien des réseaux ;
Le comportement dispendieux et souvent irresponsable des abonnés (qui comparent souvent le faible montant de la facture SONEDE par rapport à la facture de la STEG).

Pour l'année 2018, le taux de remplacement des compteurs est de l'ordre de 3% par an et celui du renouvellement des conduites de distribution de 0,5% par an. On est très loin des normes qui donnent une durée de vie moyenne de 12 ans pour les compteurs et de 40 ans pour les conduites.

La tarification de l'eau comporte 2 volets : une partie concernant la fourniture de l'eau (SONEDE) et une partie qui concerne l'assainissement (ONAS). Le prix moyen de l'eau a atteint 0,644 DT en 2018.Le coût de revient par m^3 d'eau vendu en 2016 était déjà de 0,837 DT (Etude Banque Mondiale-2018), contre un prix de vente moyen de 0,618 DT sans compter les redevances fixes (0,735 DT).Cette tarification a conduit à grever le budget de la SONEDE et à conduire l'entreprise à un déficit de 129,5 millions de DT (Estimation 2017-2018).

L'ingénieur Conseil a entrepris une simulation d'équilibre budgétaire de la SONEDE. Les résultats sont comme suit :

Tableau 32 : Essai de proposition de grille ajustée sur le coût de revient

Tranche	Tarif actuel (mm)	Nbre d'abonnés (%)	Consommation (%)	Simulation tarifaire (mm)	Plafond facture AEP actuelle	Plafond facture AEP simulé	Delta (DT)	Delta/mois (DT)
0-20	200	42,70%	8,40%	300	4	6	2	0,667
21-40	325	30,10%	21,30%	550	13	22	9	3,000
41-70	450	18,70%	22,80%	750	31,5	52,5	21	7,000
71-101	770	4,90%	9,60%	1150	77,77	116,15	38,38	12,793
101-150	940	2,00%	5,50%	1300	141	195	54	18,000
151-500	1260	1,50%	6,60%	1650	630	825	195	65,000
>500	1315	0,30%	17,20%	2080	657,5	1040	382,5	127,500
Tarif moyen	623,585			961,91				

Source : SONEDE- traitements STUDI, Eau 2050

Le tableau suivant présente le tarif de l'eau potable dans plusieurs pays :

Tableau 33: Benchmarking de la tarification de l'eau potable

Ville / Pays[49]	Tarif de l'eau potable (15 m³/mois)	
	En $/m³	Equivalent en TND/m³
Ndjamena (Tchad)	0,18	0,50
Adis Ababa (Ethiopie)	0,13	0,36
Niamey (Niger)	0,38	1,06
Dakar (Sénégal)	0,68	1,89
Alger (Algérie)	0,25	0,70
Alexandrie/Caire (Egypte)	0,11	0,31
Casablanca (Maroc)	0,99	2,76
Chafchaouen (Maroc)	0,62	1,73
Rabat (Maroc)	1,12	3,12
Bruxelles (Belgique)	4,37	12,17
Marseille (France)	4,29	11,95
Paris (France)	4,02	11,19
La Haye (Pays Bas)	5,66	15,76
Seattle (US)	9,73	27,10

Source : STUDI Eau 2050

2.5 L'ASSAINISSEMENT

2.5.1 L'assainissement urbain

L´assainissement urbain en Tunisie est pris en charge par l´Office National de l´Assainissement (ONAS) depuis 1974, année de la création de l'office.

L'ONAS intervient actuellement dans 178 communes prises en charge parmi les 350 communes existantes. Les communes prises en charges sont réparties à travers toute la Tunisie. Selon le recensement de la population de 2014, la population des villes prises en charge par l'ONAS représente environ 90% de toute la population urbaine. Il reste 175 communes non prises en charge. Ces communes se trouvent presque en totalité dans les zones défavorisées. Il s'agit de petites communes, mais qui nécessitent de gros investissements dû, entre autres, à la typologie de l´habitat le plus souvent dispersé et s´étendant en horizontal.

L'ONAS vise à généraliser le service d´assainissement pour tout le territoire national à travers (i) la prise en charge de toutes les communes d'ici 2050, selon une cadence de 30 à 40 communes par plan quinquennal et (ii) la réalisation de plusieurs programmes et projets de renforcement et d´extension des infrastructures d'assainissement et notamment les projets de stations de traitement.

[49] The Global value of water, The global water leaders group, 2019.

2.5.1.1 Hypothèses de calcul

Les principaux paramètres caractérisant la situation de l'assainissement urbain en Tunisie à l'horizon 2050 sont :

Les taux de branchements au réseau d'assainissement ;
Le taux de rejet d'eaux usées ;
Le taux d'épuration des eaux collectées ;
Les capacités de traitement des stations d'épuration.

Les consommations en eau des différents usagers (domestique, industriel, touristique) sont déterminées sur la base de la démographie et la consommation spécifique indiquées dans le paragraphe précédent ;

2.5.1.2 Résultats des projections

Raccordement au réseau d'assainissement

Le taux de branchement au réseau public d'assainissement dans le milieu urbain a augmenté de 60% en 1994 à 86% en 2018.

Selon le scénario tendanciel, une augmentation du taux de raccordement actuel en milieu urbain de 86% (année 2018) à 95% en 2050 est prévisible.

Le tableau suivant récapitule l'évolution des taux de raccordement au réseau public d'assainissement dans le milieu urbain par gouvernorat jusqu'à l'horizon 2050.

Tableau 34 : Projection des taux de raccordement au réseau public d'assainissement dans le milieu urbain par gouvernorat (%)

Année	2018	2020	2025	2030	2040	2050
Tunis	97,70	97,72	97,77	97,81	97,91	98,00
Ariana	91,50	91,78	92,48	93,19	94,59	96,00
Ben Arous	95,80	95,94	96,28	96,63	97,31	98,00
Manouba	94,20	94,31	94,59	94,88	95,44	96,00
Nabeul	90,70	90,91	91,42	91,94	92,97	94,00
Zaghouan	94,50	94,72	95,27	95,81	96,91	98,00
Bizerte	98,80	98,81	98,84	98,88	98,94	99,00
Beja	98,90	98,91	98,92	98,94	98,97	99,00
Jendouba	89,10	89,47	90,39	91,31	93,16	95,00
Le Kef	91,50	91,78	92,48	93,19	94,59	96,00
Siliana	94,80	94,94	95,28	95,63	96,31	97,00
Kairouan	90,20	90,56	91,47	92,38	94,19	96,00
Kasserine	78,30	79,28	81,73	84,19	89,09	94,00
Sidi Bouzid	61,50	63,28	67,73	72,19	81,09	90,00
Sousse	97,20	97,25	97,38	97,50	97,75	98,00
Monastir	84,50	85,16	86,80	88,44	91,72	95,00
Mahdia	69,30	70,91	74,92	78,94	86,97	95,00
Sfax	73,20	74,56	77,97	81,38	88,19	95,00

Tableau 34 : Projection des taux de raccordement au réseau public d'assainissement dans le milieu urbain par gouvernorat (%)

Année	2018	2020	2025	2030	2040	2050
Gafsa	70,90	72,41	76,17	79,94	87,47	95,00
Tozeur	87,90	88,34	89,45	90,56	92,78	95,00
Kebili	60,20	62,31	67,59	72,88	83,44	94,00
Gabes	86,50	86,97	88,14	89,31	91,66	94,00
Medenine	28,50	31,72	39,77	47,81	63,91	80,00
Tataouine	67,50	68,91	72,42	75,94	82,97	90,00
Total	**86,0**	**86,0**	**87,6**	**89,1**	**92,2**	**95,3**

Source : STUDI EAU 2050

Volumes des eaux usées collectées

Les volumes des eaux usées collectées sont estimés sur la base des projections de la consommation en eau de la SONEDE (domestique, industrielle et touristiques) et des taux de raccordement et des taux de rejet. Un taux de rejet de 80% a été adopté pour les usages domestiques et touristiques et de 90% pour l'usage industriel.

Pour tenir compte des autres sources de consommation en eau (autres que la SONEDE) et des apports pluvieux introduites dans les réseaux d'assainissement, une majoration de 5% a été adoptée.

Le tableau suivant récapitule l'évolution des volumes des eaux usées collectées par les réseaux d'assainissement dans le milieu urbain par gouvernorat jusqu'à l'horizon 2050.

Tableau 35 : Projections des volumes des eaux usées collectées (M^3/an)

Année	2020	2025	2030	2040	2050
Tunis	40,2	42,3	43,4	44,2	44,6
Ariana	19,4	22,8	26,2	33,2	41,4
Ben Arous	25,0	28,9	32,0	37,8	44,0
Manouba	11,7	13,1	14,2	16,0	17,8
Nabeul	25,0	27,5	29,7	33,6	37,4
Zaghouan	4,1	4,6	5,1	6,0	6,9
Bizerte	15,2	17,1	18,2	19,7	21,0
Beja	5,6	6,4	6,7	7,1	7,4
Jendouba	5,0	5,7	6,2	6,8	7,1
Le Kef	4,8	5,1	5,2	5,3	5,2
Siliana	3,6	3,9	4,1	4,3	4,4
Kairouan	7,8	8,9	9,9	11,5	12,7
Kasserine	6,2	7,2	8,1	9,5	10,8
Sidi Bouzid	3,4	4,4	5,4	7,3	9,3
Sousse	24,3	27,6	30,2	34,9	39,9
Monastir	22,4	24,9	27,2	31,4	35,9

Tableau 35 : Projections des volumes des eaux usées collectées (M^3/an)

Année	2020	2025	2030	2040	2050
Mahdia	7,0	8,2	9,4	11,7	14,1
Sfax	19,3	23,4	26,3	31,6	36,2
Gafsa	6,9	7,7	8,4	9,4	10,3
Tozeur	2,8	3,1	3,3	3,6	3,9
Kebili	2,2	2,7	3,2	4,2	5,2
Gabes	9,8	17,5	19,1	22,0	25,1
Medenine	8,8	10,5	12,3	15,8	19,6
Tataouine	2,5	2,8	3,1	3,4	3,8
Total	**283,0**	**326,3**	**356,7**	**410,3**	**464,2**

Source : STUDI EAU 2050

Volumes des eaux usées traitées et capacité de traitement

Le parc de l'ONAS comptait en 2018, 114 stations d´épuration urbaines, réparties sur l'ensemble du territoire du pays, destinées pour le traitement des eaux usées provenant du milieu urbain. Ces stations d'épuration ont traité en 2018 un volume de 274 millions m^3 d'eaux usées par an et une charge de 112 mille tonnes de pollution organique.

Le taux d'épuration actuel des eaux collectées avoisine 99%. Toutefois, les gouvernorats d'EL Kef, Siliana et Gafsa enregistrent des taux d'épuration relativement faibles d'environ 70%. A l'horizon 2050, un taux d'épuration de 100% des eaux collectées est envisageable.

Les tableaux suivants récapitulent l'évolution des taux d'épuration et des volumes traitées dans le milieu urbain par gouvernorat jusqu'à l'horizon 2050.

Tableau 36 : Projection des taux d'épuration (%)

Année	2017	2020	2025	2030	2040	2050
Tunis	99,7%	99,7%	99,8%	99,8%	99,9%	100%
Ariana	99,7%	99,7%	99,8%	99,8%	99,9%	100%
Ben Arous	99,7%	99,7%	99,8%	99,8%	99,9%	100%
Manouba	99,7%	99,7%	99,8%	99,8%	99,9%	100%
Nabeul	99,7%	99,7%	99,8%	99,8%	99,9%	100%
Zaghouan	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100%
Bizerte	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100%
Beja	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100%
Jendouba	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100%
Le Kef	71,8%	74,4%	78,6%	82,9%	91,5%	100%
Siliana	63,6%	66,9%	72,4%	77,9%	89,0%	100%
Kairouan	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100%
Kasserine	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100%
Sidi Bouzid	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100%

Tableau 36 : Projection des taux d'épuration (%)

Année	2017	2020	2025	2030	2040	2050
Sousse	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100%
Monastir	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100%
Mahdia	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100%
Sfax	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100%
Gafsa	69,9%	72,6%	77,2%	81,8%	90,9%	100%
Tozeur	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100%
Kebili	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100%
Gabes	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100%
Medenine	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100%
Tataouine	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100%
Total	**98,8%**	**99%**	**99%**	**99%**	**100%**	**100%**

Source : ONAS

Tableau 37 : Projection des volumes des eaux traitées (Mm^3/an)

Année	2020	2025	2030	2040	2050
Tunis	40,1	42,2	43,3	44,1	44,6
Ariana	19,3	22,7	26,1	33,1	41,4
Ben Arous	24,9	28,9	31,9	37,7	44,0
Manouba	11,6	13,0	14,1	16,0	17,8
Nabeul	25,0	27,4	29,7	33,5	37,4
Zaghouan	4,1	4,6	5,1	6,0	6,9
Bizerte	15,2	17,1	18,2	19,7	21,0
Beja	5,6	6,4	6,7	7,1	7,4
Jendouba	5,0	5,7	6,2	6,8	7,1
Le Kef	3,6	4,0	4,4	4,9	5,2
Siliana	2,4	2,8	3,2	3,9	4,4
Kairouan	7,8	8,9	9,9	11,5	12,7
Kasserine	6,2	7,2	8,1	9,5	10,8
Sidi Bouzid	3,4	4,4	5,4	7,3	9,3
Sousse	24,3	27,6	30,2	34,9	39,9
Monastir	22,4	24,9	27,2	31,4	35,9
Mahdia	7,0	8,2	9,4	11,7	14,1
Sfax	19,3	23,4	26,3	31,6	36,2
Gafsa	5,0	6,0	6,9	8,6	10,3
Tozeur	2,8	3,1	3,3	3,6	3,9

Tableau 37 : Projection des volumes des eaux traitées (Mm^3/an)

Année	2020	2025	2030	2040	2050
Kebili	2,2	2,7	3,2	4,2	5,2
Gabes	9,8	17,5	19,1	22,0	25,1
Medenine	8,8	10,5	12,3	15,8	19,6
Tataouine	2,5	2,8	3,1	3,4	3,8
Total	**278,3**	**322,0**	**353,1**	**408,3**	**464,2**

Source :

Le volume à traiter par les stations d'épuration atteindra en 2050 environ 464 millions de m^3, soit une augmentation de 66% par rapport au volume actuel.

La capacité hydraulique actuelle totale des STEP est de 343.4 Mm^3/an (année 2018), soit un taux de saturation hydraulique global d'environ 80%.

Pour répondre aux besoins croissants, il est prévu d'accroitre la capacité de traitement pour atteindre en 2050 environ 580 Mm^3/an, soit une augmentation d'environ 70% par rapport à la capacité actuelle. Un taux de saturation des stations d'épuration de 80% a été maintenu.

Pour les quatre gouvernorats du Grand Tunis, le traitement des eaux usées se fera dans des pôles d'épuration avec des bassins versants différents du découpage administratif entre les gouvernorats. Ainsi, une seule capacité de traitement pour le Grand Tunis est considérée.

Le tableau suivant récapitule l'évolution de la capacité de traitement par gouvernorat jusqu'à l'horizon 2050.

Tableau 38 : Projection de la capacité de traitement par gouvernorat (Mm^3/an)

Année	2020	2025	2030	2040	2050
Grand Tunis	119,9	133,5	144,4	163,7	184,8
Nabeul	31,2	34,3	37,1	41,9	46,8
Zaghouan	5,1	5,7	6,3	7,5	8,7
Bizerte	19,0	21,4	22,7	24,6	26,2
Beja	7,0	8,0	8,4	8,9	9,3
Jendouba	6,3	7,1	7,7	8,5	8,9
Le Kef	4,5	5,0	5,4	6,1	6,6
Siliana	3,0	3,5	4,0	4,8	5,5
Kairouan	9,7	11,1	12,4	14,3	15,9
Kasserine	7,8	9,0	10,1	11,9	13,5
Sidi Bouzid	4,2	5,5	6,7	9,1	11,6
Sousse	30,4	34,5	37,7	43,7	49,9
Monastir	28,0	31,1	34,0	39,3	44,9
Mahdia	8,7	10,3	11,8	14,6	17,7
Sfax	24,1	29,3	32,9	39,5	45,2
Gafsa	6,2	7,5	8,6	10,7	12,9
Tozeur	3,6	3,9	4,1	4,5	4,8

Tableau 38 : Projection de la capacité de traitement par gouvernorat (Mm^3/an)

Année	2020	2025	2030	2040	2050
Kebili	2,8	3,3	4,0	5,2	6,6
Gabes	12,2	21,9	23,8	27,5	31,4
Medenine	11,0	13,2	15,3	19,7	24,4
Tataouine	3,1	3,5	3,8	4,3	4,7
Total	**347,9**	**402,6**	**441,4**	**510,4**	**580,3**

Source

La capacité annuelle de traitement actuelle dans le grand Tunis est de 120 Millions de m^3, ce qui représente environ 35% de la capacité de traitement totale. Elle atteindra environ 185 Millions de $m^{3/}$an en 2050.

2.5.1.3 Répartition des STEP par procédé et par niveau de traitement

Dans le parc des stations d'épuration, les procédés adoptés sont pour la plupart des procédés conventionnels de type boue activée (98 STEP, soit 86% du nombre total). Le reste des STEP sont réparties sur les procédés de type lagunage naturel (LN) et lagunage aéré (LA) (14 STEP) et de type lits bactériens (LB) (2 STEP).

Les procédés dominants sont les boues activées (faible charge/moyenne charge). Ce choix de procédé de traitement est à priori maintenu pour les réalisations futures. Le procédé de boues activées faible charge est adopté pour les stations d'épuration de petite et moyenne taille (< 100.000 équivalent habitant « EH »). Pour les stations d'épuration de taille > 100.000 EH, soit l'équivalent d'une capacité de 12 000 m^3/j, le choix est plutôt orienté vers les procédés des boues activées moyenne charge avec l'intégration de la cogénération et la valorisation énergétique des boues des stations d'épuration par la production de l'énergie électrique et thermique à partir du biogaz. Ceci permettra de réduire la consommation en énergie électrique des stations d'épuration qui peut atteindre 60% (ONAS).

Selon les orientations de l'ONAS, les procédés de traitement envisagés à l'horizon 2050 sont exclusivement des procédés conventionnels de type boue activée. Le nombre de STEP prévisionnel en 2050 est de 165, réparti en 140 STEP à faible charge et 25 à moyenne charge, capacité de traitement respective de 220 Mm^3/an et 360 Mm^3/an, soit 38% et 62% de la capacité totale.

L'emploi de procédé de traitement plus poussé tels que les technologies membranaires (osmose inverse, bioréacteur à membrane), pourra être envisagé en cas d'adoption d'un cadre réglementaire et normatif pour la réutilisation non restrictive en agriculture ou dans le cas d'exigences éventuelles imposées par le degré de vulnérabilité des milieux récepteurs (rejet en amont de barrage, zone de baignade ou rejet dans un site Ramsar).

Les stations d´épuration sont conçues et fonctionnent suivant différents objectifs de traitement.

Sur un total de 114 STEP, seulement 25 STEP sont actuellement dotés de traitement tertiaire. Le volume total des eaux épurées, est traitée jusqu'au niveau tertiaire représente seulement 10% du volume total traité.

L'ONAS s'est engagé dans un programme d'amélioration de la qualité des eaux traitées par le recours au traitement complémentaire (tertiaire). A l'horizon 2050, au moins 40% du parc des stations d'épuration urbaines sera doté de traitement tertiaire et environ la moitié du volume des eaux usées sera traité jusqu'au niveau tertiaire.

Le tableau suivant donne l'évolution du nombre et de capacité de STEP par niveau de traitement jusqu'au l'horizon 2050 :

Tableau 39 : Répartition des STEP et du volume traité en fonction du niveau de traitement

	2018						2050					
Procédé	**Nb**	**%**	**Capacité (Mm^3/an)**	**%**	**Volume traité (Mm^3/an)**	**% VEUT**	**Nb**	**%**	**Capacité (Mm^3/an)**	**%**	**Volume traité (Mm3/an)**	**% VEUT**
Tertiaire	25	22%	42	12%	34	12%	67	41%	277	48%	221	48%
Secondaire	89	78%	301	88%	241	88%	98	59%	304	52%	243	52%
Total	114	100%	343	100%	275	100%	165	100%	580	100%	464	100%

Source ONAS

2.5.1.4 Rejets des STEP

L'impact anthropique sur la qualité des ressources se traduit par l'implémentation des STEP et des rejets dans les milieux récepteurs dans le modèle. Dans ce contexte, les capacités projetées des STEP existantes et planifiées (extension ou création de nouvelle STEP) sont modélisées. La figure ci-après présente un exemple de la projection des capacités de traitement à Tunis jusqu'à 2050.

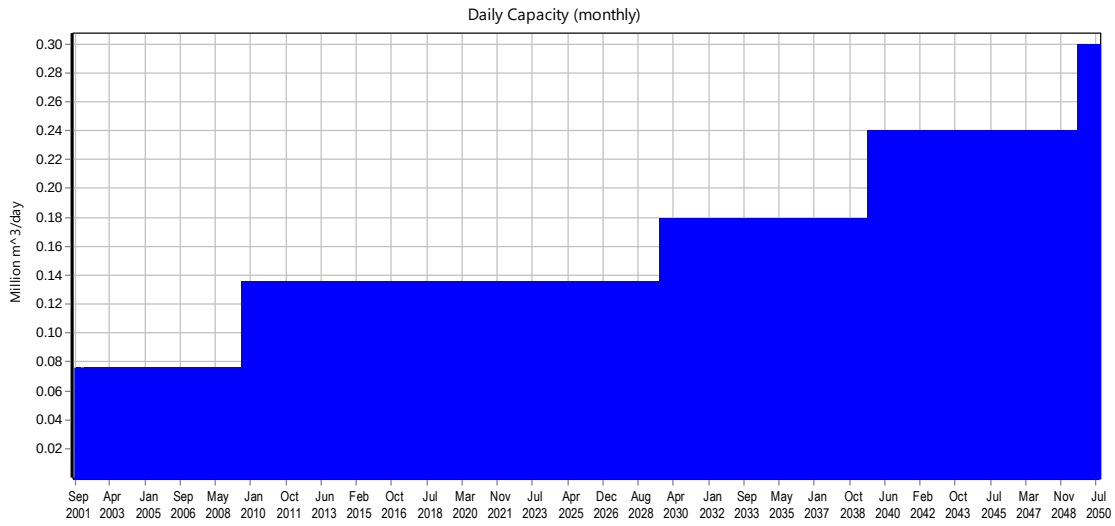


Figure 128 : Projection tendancielle de la capacité de traitement des eaux usées à Tunis jusqu'à 2050

Source : STUDI Eau 2050

Les rejets des eaux usées traitées dans les milieux récepteurs (Mer, Oued et sebkhat) et les rejets des eaux de drainage ont un impact sur la qualité des ressources en eaux et les ressources en sol dans ces milieux. Ces rejets rejoignent le système offre-demande directement (Les pompages des eaux directement sur les oueds par les « riverains ») ou indirectement (recharge dans les nappes). De ce fait, le contrôle de qualité des eaux rejetées constitue un forçage important dans les projections puisque la qualité est une déterminante de l'usage. La détérioration de la qualité induit à l'augmentation des couts de traitement au prélèvement.

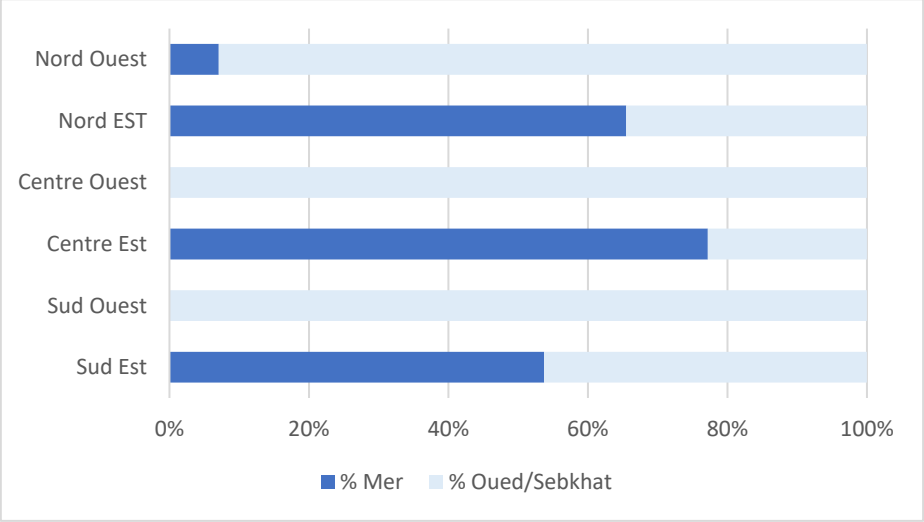


Figure 129 : Rejet des eaux usées traitées par rapport au milieu récepteur

Source : STUDI Eau 2050

La connexion entre la STEP et le milieu récepteur est implémentée pour toutes les régions comme l'indique le graphique suivant en indiquant le pourcentage de rejet pour chaque milieu.

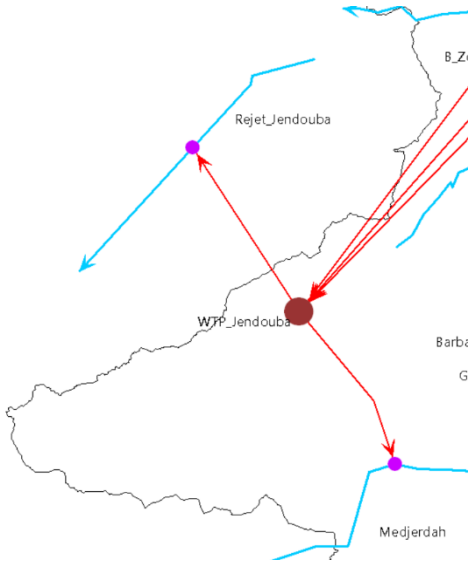


Figure 130 : Modélisation des rejets des STEP dans les milieux récepteurs dans le modèle

Source : STUDI Eau 2050

Le coût indirect de l'inaction se traduit par des coûts supplémentaires/additionnelles lors de l'exploitation des ressources en aval. Il est donc fortement recommandé que les STEP respectent les normes de traitement, surtout en amont des systèmes naturels. Les coûts évités d'assainissement et de traitement des milieux récepteurs à l'aval (mer, barrage, oued et nappes) étant supérieurs aux coûts de traitement. Ceci d'autant plus par l'accumulation des impacts des rejets sur plusieurs années. En effet, l'accumulation de pollution « à bas bruit » et leurs impacts cumulées dans le temps et dans l'espace ont des conséquences parfois irréversibles et à coût démesuré par rapport aux capacités de mobilisation des investissements.

2.5.2 L'assainissement rural

Le monde rural tunisien, regroupe environ un tiers de la population nationale, soit 3,6 millions d'habitants et 950.000 logements, selon le dernier recensement de la population et de l'habitat de 2014 avec une disparité régionale du niveau de ruralité. Environ 9,6% des logements dans le milieu rural sont connectés au réseau ONAS, 75% rejettent leurs eaux usées dans les puits perdus et 15,4% les rejettent dans la nature.

L'assainissement en milieu rural constitue une urgence en Tunisie, notamment dans les régions du Nord-Ouest et Centre-Ouest qui sont les plus confrontés aux problèmes d'accès aux services d'eau et d'assainissement (zones enclavées et reliefs).

Malgré les efforts entrepris dans l'élargissement de l'accès aux services d'eau et d'assainissement ces trente dernières années, l'assainissement en milieu rural en Tunisie reste très peu développé et assez limité. Ceci est lié à plusieurs causes dont principalement la taille des localités, la typologie de l'habitat (dispersé dans l'espace), le manque d'investissement et de financement ainsi que le manque de clarté du rôle des acteurs.

Actuellement, 9 STEP rurales avec une capacité variant entre 10 et 520 m^3/j sont en fonctionnement. Ces STEP assurent le traitement des eaux usées en provenance de localités rurales agglomérées. Elles traitent 0,2% de la capacité totale du parc des STEP en Tunisie.

A présent, des projets ont été engagés au niveau de 30 localités. En partant de la situation actuelle et sur la base d'hypothèses prospectives portant sur l'évolution future de l'assainissement en milieu rural jusqu'à l'horizon 2050, quatre scénarios ont été explorés. Il s'agit des tendances (évolution de la situation présente compte tenu de ce qui est déjà engagé et de ce qui est prévisible), des nouvelles dynamiques (scénarios 1 et 2 : évolution qui démarque de la situation actuelle) et du risque (les menaces). Dans le scénario tendanciel, on estime une meilleure maitrise de l'assainissement rural par rapport à la situation actuelle avec un taux de raccordement pouvant atteindre 20% et 30 STEP.

Tableau 40 : Projection des volumes des eaux traitées (Mm3/an) dans le monde rural

Désignation	2018	2020	2025	2030	2040	2050
Taux de raccordement au réseau d'assainissement	10%	11%	12%	14%	17%	20%
Population raccordée au réseau	360 368	374 407	420 596	458 098	514 741	563 939
Volume Eaux usées collectées (m^3/j)	21 334	22 464	25 909	29 318	35 002	40 604
Nombre de STEP	9	10	14	17	23	30
Capacité de traitement (m3/j)	1 711	1960	2584	3207	4453	5700
Taux d'épuration	8%	9%	10%	11%	13%	14%

Source : ONAS

2.5.3 La réutilisation des eaux traitées

La réutilisation des eaux usées en Tunisie est une pratique qui remonte à plus de cinq décennies. Elle s'inscrit dans les principes de l'économie circulaire et bénéficie d'un cadre réglementaire riche et varié (code des eaux, lois, décrets, normes, directives et recommandations). Cette pratique qui s'insère également dans le cadre de la mise en œuvre du concept de développement durable des ressources naturelles figure parmi les orientations de la stratégie nationale Eau 2050. Elle bénéficie d'un cadre institutionnel développé qui comporte plusieurs acteurs au niveau national, régional et local. Les principaux acteurs qui jouent un rôle déterminant dans la REUSE sont les producteurs (l'ONAS), les gestionnaires (CRDA, GDA, privé, etc.), les contrôleurs et l'utilisateur final. La Tunisie a engagé depuis plusieurs années des programmes de recherche sur la réutilisation des eaux épurées et a réussi d'acquérir un savoir technique dans le domaine.

Malgré les efforts mis en place depuis 50 ans, la Tunisie a encore du chemin dans la réutilisation des EUT.

Les eaux usées traitées peuvent constituer une ressource de substitution des eaux conventionnelles notamment dans les zones où les ressources en eau sont très sollicitées. C'est une ressource qui a l'avantage d'être disponible d'une manière régulière tout au long de l'année, particulièrement en période estival.

2.5.3.1 Potentialités et usage à l'horizon de 2050

Sur l'ensemble des STEP existante en Tunisie, environ 103 STEP présentent actuellement des potentialités de réutilisation des eaux usées traitées. Le pourcentage des volumes des EUTR n'excède pas actuellement 10 %. Ce taux était dans les années 2000 de 18 %. Compte tenu de la situation actuelle de la REUSE, ainsi que des programmes engagés et en cours, une augmentation du taux de réutilisation jusqu'à 30% est envisageable à l'horizon de 2050.

Dans ce qui suit une description des potentialités de REUSE par secteur d'activité.

La REUSE directe :

L'irrigation agricole :

Les besoins en eau de l'agriculture constituent un marché essentiel pour les EUT. Actuellement, la superficie totale aménagée est de 8 532 ha répartie sur 32 périmètres. La superficie irriguée est limitée à 2 685 ha durant la campagne 2017-2018. Selon les données de la DG/GREE, le volume des EUT utilisé à cette fin est de 16,6 Mm^3. De nombreuses études sur la REUSE dans l'agriculture tunisienne ont été réalisées pour explorer les possibilités de création et l'extension des périmètres irrigués dans plusieurs gouvernorats comme Nabeul, Sousse (Ksiba-Thrayet), Sfax (El Hajeb), Gafsa (El Aguila, El Guetar et Metlaoui), Gabès (oasis d'El Hamma), Sidi Bouzid (Sidi Ali Ben Oun, Bir El Hfai, Sidi Bouzid, Maknassi, Mazouna) et Mahdia. Avec la réalisation des projets en cours et des projets identifiés, et compte tenu des orientations nationales pour assurer la sécurité alimentaire du pays et encourager la REUSE dans le domaine agricole, la superficie totale irriguée serait de **12 500 ha** à l'horizon de 2050, impliquant un volume de **56,5** Mm^3 nécessaire pour l'irrigation des PI, en considérant une consommation en eau moyenne de 4500 m^3/ha. Ce volume représente 10 % du volume total des EUT estimées à l'horizon 2050.

Terrains de Golf :

Actuellement, il existe en Tunisie 10 terrains de golf qui utilisent les EUT pour couvrir environ 90% de leurs besoins en eaux d'irrigation. Ces terrains sont situés principalement dans des zones touristiques comme Gammarth, Hammamet, Sousse, Monastir, Djerba et Tabarka et couvrent une superficie totale de 1080 ha. La superficie irriguée par des EUT est de 612 ha. Le volume des eaux usées traitées réutilisé est de **7,6** Mm^3, ce qui représente 3% du total des EUT produites.

A l'horizon de 2050, 17 nouveaux terrains pourraient être crées selon la stratégie proposée du Ministère du Tourisme et de l'Artisanat. Cela pourrait se traduire par une augmentation des volumes des EUT utilisé jusqu'à **14** Mm^3.

Espaces verts et tourisme :

Les espaces verts regroupent les parcs urbains, les jardins publics, les ronds-points aménagés, les terres-pleines aménagées, les arbres d'alignement, le reboisement (talus, carrières, sebkhas, décharges, etc.) et les zones de détente forestières.

Un programme national de promotion des espaces verts a été mis en œuvre et a permis d'augmenter le taux d'espaces verts de 4,4 m² par habitant en 1994 à 16,23 m² par habitant en 2009.

Durant la dernière décennie, une dégradation des espaces verts a été observée et ce à cause du manque d'entretien, ce qui a induit une réduction des superficies et des taux d'espaces verts par habitant. Le taux actuel d'espaces verts à l'échelle national avoisine les 12 m²/hab.

L'Arrosage des espaces verts par les EUT en milieu urbain et autour des aéroports, ainsi que les grands axes routiers et les jardins d'hôtels est encore limité en Tunisie. Les volumes actuellement utilisés ne dépassent pas 1 Mm3. Compte tenu du potentiel de réutilisation dans les espaces verts municipaux et notamment dans la municipalité de Tunis, dont la superficie des espaces verts avoisine 1062 ha, et qui

envisage la mise en place des réseaux d'arrosage pour plusieurs espaces tel que le belvédère, Gorgani, jardins japonais avec une extension sur 7 ha, le jardin de la Méditerranée (7 ha), Pépinières de Tunis (3 ha) et El Agba (22 ha), les volumes réutilisés pourraient augmenter jusqu'à 3,8 Mm^3 à l'horizon de 2050.

Les besoins potentiels pour l'irrigation des jardins d'hôtels et des espaces verts dans les zones touristiques peuvent constituer également des perspectives intéressantes pour les EUT. En effet, l'AFT a évalué la demande de ces usages à environ **8 Mm3/an**.

L'étude relative à la rentabilité d'utilisation des EUT dans les secteurs autres que les PI réalisée dans le cadre du projet PISEAU en 2005 pour le compte de la DGEQV, a estimé le potentiel de réutilisation dans les pôles touristiques pour l'arrosage des jardins et des pelouses à environ 1,5 Mm3.

En industries :

La REUSE dans le secteur industriel en Tunisie est quasiment absente. Toutefois il existe quelques industries dont la consommation en eau est importante et qui ont manifesté un intérêt pour la REUT tel que, la société sidérurgique d'El Fouledh à Menzel Bourguiba, la raffinerie de la STIR, la SNCPA à Kasserine, le groupe chimique de Gabes et de Gafsa et les laveries de la CPG. La SNT a également manifesté un besoin de la REUSE pour le lavage des bus. Il existe également un potentiel de REUSE pour alimenter plusieurs zones industrielles. L'étude réalisée en 2002 sur la stratégie nationale de la valorisation des EUT a analysé les potentiels de réutilisation dans la zone industrielle de Ben Arous et la cimenterie de Jebel Jelloud et les pôles industriels de Bizerte et Sfax (cimenterie, sidérurgie), zone industrielle de Gannouch à Gabès, ainsi que les centrales électriques.

Selon l'Etude relative à la rentabilité d'utilisation des EUT dans les secteurs autres que les PI, en suivant, les volumes de REUSE dans le secteur industriel, pourraient atteindre **5,0** Mm^3 à l'horizon de 2050, représentant environ 1,0% des EUT générées.

Les opportunités de REUSE en industrie nécessitent des études détaillées qui identifierait les exigences et la faisabilité de chaque schéma de REUSE. En effet, l'innovation de certains procédés et les techniques d'économie d'eau risquent de limiter considérablement les besoins en eau au niveau de certaines unités industrielles. C'est le cas de la Cimenterie de Jebel Jelloud où le procédé de fabrication du ciment a été modifiée pour passer de la voie humide à la voie sèche. Certaines pistes sont encore à explorer comme l'installation des aires de lavage pour les véhicules municipaux (camions et bennes à ordure), la REUSE au niveau des stations de service et station de lavage, le complexe portuaire de Rades, les centrales électriques de la STEG, les industries de textiles de tissage et de délavage de jeans (Sahel), les tanneries et les unités de traitement du cuir, les industries de construction, les industries métallurgique et le pôle du groupe chimique de Sfax.

Les usages environnementaux

Recharge des nappes phréatiques

La recharge artificielle des nappes phréatiques constitue une opportunité pour la REUSE compte tenu de la baisse du niveau piézométrique et des intrusions salines observés dans certaines nappes. Actuellement on recense **2,13** Mm^3/an utilisés dans la recharge des nappes à partir des STEP de Korba, Boumerdes, El Jem, Sfax-Sud et Medenine. Cela correspond à un taux de REUSE de **0,8**%. Une liste des nappes potentiellement rechargeables a été dressé dans le cadre de l'étude de faisabilité technico-économique et environnementale de la recharge artificielle des nappes phréatiques par les EUT réalisée en 2011 par la DGEQV. Il s'agit en priorité de la nappe d'El Fahs (1,22 Mm^3/an), El Aouinet – Gabès Nord (0,99 Mm^3/an), et Sombat -El Hamma (1,48 Mm^3/an). Sur la base des conclusions de cette étude et compte tenu des projets de recharge réalisés (y compris la substitution de la recharge de la plaine de Mornag par les EUT de la STEP Sud Meliane (10 Mm^3/an) et programmés comme celui de la nappe de Grombalia (16 Mm^3/an), les volumes d'EUT utilisées pour la recharge des nappes phréatiques pourraient atteindre **33.7** Mm^3 à l'horizon de 2050.

REUSE Ecologique :

En Tunisie, les besoins en eaux écologiques s'avèrent indispensables pour le fonctionnement de plusieurs zones humides, notamment celles classées sites Ramsar (42 sites parmi un total de 256 zones humides). Ces besoins tendent vers l'augmentation à l'horizon de 2050 avec les changements climatiques futurs (baisse des précipitations et augmentation des températures). Pour cela, le transfert des eaux usées traitées s'avère une bonne alternative pour résoudre les problèmes de déficit hydrique dans les milieux les plus vulnérables. C'est le cas de la lagune de **Korba** qui est alimentée actuellement, moyennant un transfert des eaux traitées de la STEP de Korba durant le printemps et l'été avec un débit journalier d'environ **5 000** m^3/jour. Les lagunes de **Soliman**, **Tazarka** et **Maamoura** subissent les mêmes impacts anthropiques vécus par celle de Korba et ils auront aussi besoin d'un apport en eaux écologique à définir. Les besoins en eaux écologiques du lac de l'**Ichkeul** (80 – 120 Mm^3/an) qui est actuellement alimenté par les lâchers d'eaux de barrages ne sont que partiellement couverts. D'où l'intérêt de combler ce déficit avec les eaux usées traitées des STEP qui se trouvent à proximité (Bizerte, Mateur et Menzel Bourguiba). La lagune de **Ghar el Melh** reçoit actuellement les eaux de ruissellement, les eaux de drainage agricole et les eaux de la STEP de Aousja. Compte tenu de ces apports, le besoin en eaux écologiques pour la lagune est estimé à environ **40 000** m^3/jour.

D'autres zones humides peuvent représenter un réservoir d'eaux écologiques comme les **Sebkhats de Sijoumi** et de **Kelbia** afin d'accomplir leurs rôles de recharge de nappes et d'atténuation des crues.

En plus de la possibilité de REUSE pour préserver et maintenir les fonctionnalités écologiques des zones humides, il existe une possibilité de REUSE dans des étangs de loisir et d'embellissement (lacs de terrains de golf, parcs urbains, stockage pour l'irrigation des espaces verts, etc.). La REUSE dans les centres de pisciculture bien qu'elle constitue également une option, elle ne semble pas présenter une alternative prometteuse en Tunisie.

Sur la base de ces considérations, les besoins en eaux écologiques pourraient atteindre **25 Mm^3/an en 2050.**

Les réutilisations potentielles telles que présentées précédemment permettraient d'augmenter le taux de réutilisation des eaux traitées par l'ensemble des STEP à l'horizon de 2050, à 30%.

Les tableaux en annexe fournissent la répartition des volumes des EUT potentiels pour réutilisation en 2050 et par gouvernorat selon les différents usages possibles.

2.5.3.2 Sollicitation écologique

Nous entendons par sollicitation une requête faite au modèle pour solliciter une réponse raisonnée et anticipative (du modèle) par rapport à la gestion de la demande en eau. Les différentes requêtes déclinées par la suite, constituent les leviers d'action du « modélisateur » pour contrôler, calibrer, équilibrer et optimiser la demande future en eau. Ceci aux fins de l'aide à la décision et pour converger vers une solution optimale et/ou résiliente qui serait communiquée au « décideur »

En vue d'assurer la demande environnementale en eau dans chacune des six régions, deux ensembles des zones humides sont identifiés en fonction des eaux écologiques :

L'ensemble des zones humides naturelles plus ou soumises aux aménagements et qui manifestent ainsi un certain besoin en eaux écologiques. Ce sont l**es zones les plus vulnérables quant aux manques d'eau pour le maintien du fonctionnement des zones humides (Exemple l'Ichkeul).**
L'ensemble des zones humides naturelles ou artificielles qui disposent d'un potentiel d'eau disponible. **Ces zones sont susceptibles de fournir de l'eau écologique,** soit à travers des liens naturels ou moyennant des aménagements spécifiques, conduites ou transferts

L'empreinte écologique de l'eau développée dans le rapport de diagnostic, est considérée dans le modèle comme le montre la figure suivante.

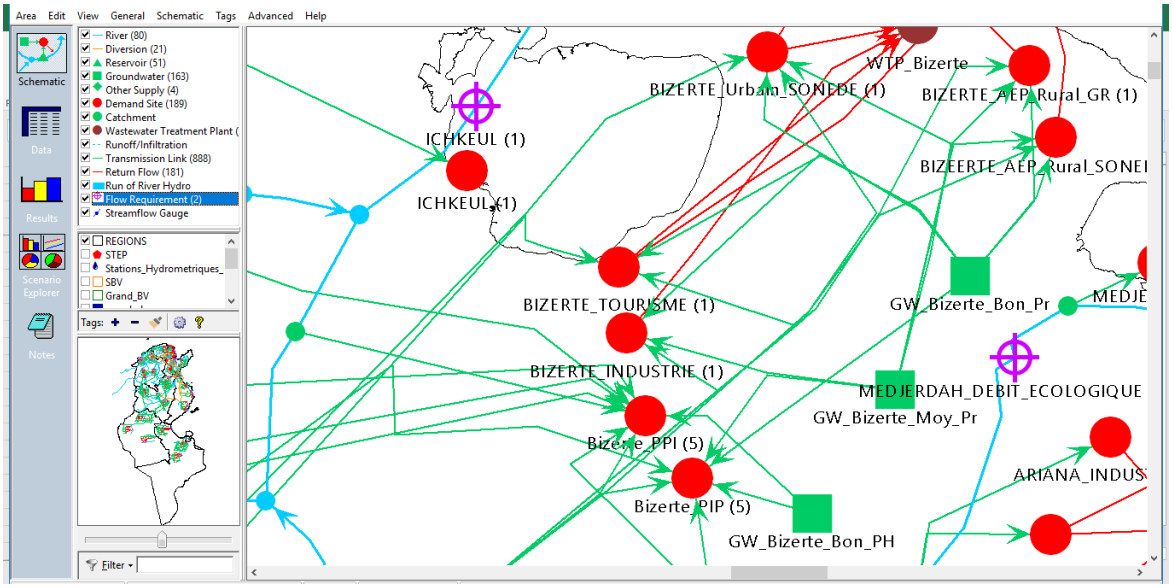


Figure 131 : Implémentation des demandes écologiques dans le modèle

Source : STUDI Eau 2050

2.5.4 Benchmarking

Cette partie décrit différents retours d'expériences de projets internationaux de réutilisation des eaux usées traitées qui peuvent être sources d'inspiration à plusieurs niveaux de décision tunisiens. Malgré les efforts mis en place depuis 50 ans, la Tunisie a encore du chemin dans la réutilisation des EUT. Le graphique ci-après indique la position de la Tunisie par rapport à d'autres pays du moyen Orient et Afrique du Nord.

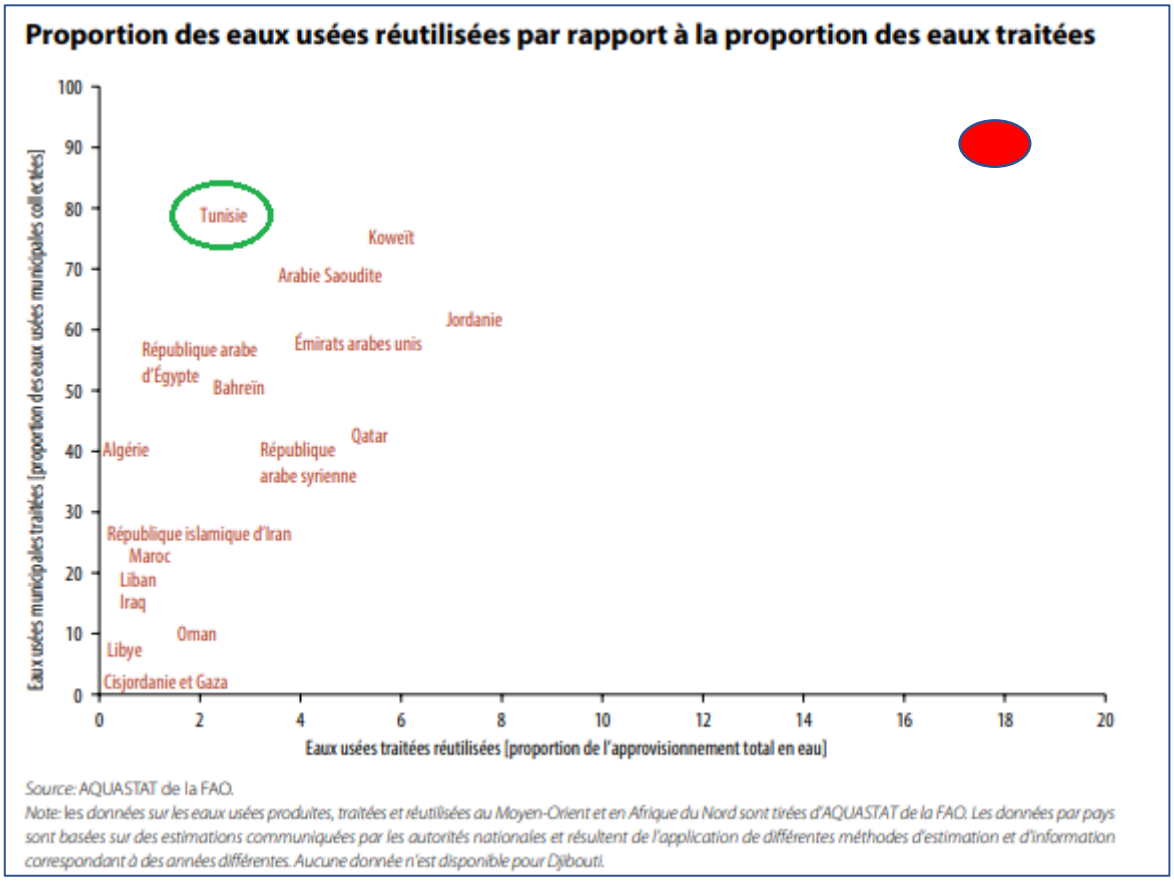


Figure 132 : Ratio d'eau usée réutilisée /Ratio d'eau traitée

Source : Au-delà des pénuries la sécurité de l'eau au MENA - BM

En fonction des exigences de qualité des consommateurs, deux grandes classes de réutilisation des eaux usées traitées peuvent être définies :

Les usages potables qui peuvent être directs, après un traitement poussé, ou indirects, après passage dans le milieu naturel.

Les usages non potables dans les secteurs agricoles (irrigation), industriel et urbain (Voir Tableau ci-après).

En Europe, le règlement du 25 mai 2020 relatif aux exigences minimales applicables à la réutilisation de l'eau*, établit 4 qualités d'eaux réutilisées pour l'irrigation agricole. La REUT, combiné a à une irrigation agricole économe, a le plus fort impact sur les prélèvements à la source.

Tableau 41 : Types de réutilisation : exigences de mise en œuvre et de gestion[50]

	Application	Exigences	Facteurs déterminants
Potable	Production indirecte d'eau potable	• Etude des risques sanitaires • Qualité de l'eau (pathogènes) • Traitement avancée • Dilution avec de l'eau naturelle	• Manque d'eau et sécheresse • Autonomie en eau • Réapprovisionnement des nappes • Augmentation de la population • Contraintes de réglementation
	• Production directe d'eau potable		• "Pénurie d'eau" • Pas d'alternative (Windhoek) • Aide publique (Denver)
Non potable	Irrigation en agriculture - *cultures maraîchères* - *arbres fruitiers* - *cultures industrielles* - *aquaculture*	• Impact sur le sol • Qualité de l'eau (pathogènes, salinité) • Traitement secondaire et désinfection	• Manque d'eau et sécheresse • Alternative au rejet des effluents • Réduction de coût • Valeur fertilisante
	Activités récréatives - *augmentation des cours d'eau pour la pêche, natation, etc.*	• Qualité de l'eau (pathogènes)	• Manque d'eau et sécheresse • Amélioration de l'environnement
	Utilisations industrielles - *eau de refroidissement* - *eau de process*	• Qualité de l'eau (pathogènes, salinité) • Traitement avancé	• Prix de l'eau • Autonomie d'eau
	Utilisations urbaines - *irrigation de parcs, écoles*	• Qualité de l'eau (pathogènes) • Systèmes de distribution double • Augmentation de la population	• Manque d'eau et sécheresse • Politique de réutilisation des pouvoirs publics
	- *golfs, cimetières, résidences* - *protection incendie* - *recyclage en immeuble*	• Traitement tertiaire et désinfection	• Normes de rejet contraignantes • Amélioration de l'environnement

Au plan mondial, la réutilisation des EUT par l'agriculture, l'industrie et les usages domestiques couvre respectivement 70 %, 20 %, 10 % de leur demande en eau.

Il apparaît que la **réutilisation pour l'irrigation** est essentiellement présente dans les pays réputés agricoles mais dont les ressources hydriques sont faibles, comme le bassin méditerranéen, le Sud des Etats-Unis. Les plus grands projets de réutilisation ont été développés dans les régions de l'Ouest et de l'Est des Etats-Unis, l'espace méditerranéen, l'Australie, l'Afrique du Sud et dans les zones semi-arides de l'Amérique du Sud et de l'Asie du Sud.

Au niveau mondial, **l'irrigation de cultures ou d'espaces verts** est la voie la plus répandue de réutilisation des eaux usées urbaines.

L'expérience de Mexico City apparaît comme l'un des plus importants projets de réutilisation des eaux usées au niveau mondial. Presque 100 % des eaux usées brutes de la capitale mexicaine (de 45 à 300 m^3/s par temps de pluie) sont réutilisées pour l'irrigation de plus de 85000 ha de diverses cultures agricoles.

En ce qui concerne **la réutilisation industrielle** des eaux usées, et pour certains pays et types d'industries, l'eau recyclée fournit 85 % des besoins globaux en eau. Les secteurs les plus grands consommateurs en eau sont les centrales thermiques et nucléaires (eau de refroidissement) et les papeteries.

[50] V. Lazarova (CIRSEE - Lyonnaise des Eaux) et al., « La réutilisation des eaux usées : un enjeu de l'an 2000 »

Au Maroc Près de 30% des eaux traitées dont réutilisées pour le lavage des phosphates. En effet, dans l'usine de lavage des phosphates de Lahrach à Khouribga (exploitée par le groupe OCP) 87% de l'eau utilisée est recyclée et 70% du besoin annuel en eau est assurée par la STEP de Khouribga.

Les usages urbains et périurbains des eaux usées correctement traitées sont bien développés et deviennent un élément fondamental de la politique de gestion intégrée de l'eau dans les grandes agglomérations dans plusieurs pays. Les usages les plus courants sont l'irrigation d'espaces verts (parcs, golfs, terrains sportifs), l'aménagement paysager (cascades, fontaines, plans d'eau), le lavage des rues ou des véhicules et la protection contre l'incendie. Une autre application importante est le recyclage en immeuble avec, par exemple l'utilisation de l'eau ménagère traitée pour le lavage des sanitaires. Plusieurs municipalités du Japon et des villes des Etats-Unis ont déjà construit des systèmes de distribution double : eau potable et eaux usées à réutiliser.

Pour la production directe d'eau potable à partir des eaux usées, la station de traitement des eaux usées de Windhoeck, en Namibie, est le seul exemple de réutilisation directe pour la potabilisation à grande échelle (21 000 m^3/jour).

Le projet de la région de Dan est le plus grand système de REUT en Israël. Il intègre : (1) la collecte et le traitement des eaux usées de la région métropolitaine de Tel-Aviv et de plusieurs autres municipalités voisines (population totale d'environ 1,3 million d'habitants avec un débit moyen d'eaux usées municipales de 270 000 m^3/jour), (2) la recharge des eaux souterraines, et (3) le pompage des eaux souterraines pour une REUT indirecte. 100% % des eaux usées de la région métropolitaine de Tel-Aviv sont ainsi traitées et réutilisées pour l'agriculture et les travaux publics. Ce projet a été cité comme un modèle mondial par l'Organisation des Nations Unies.

La méthode spécifique de recharge-pompage de la région de Dan pour la REUT indirecte inclut un traitement par l'aquifère du sol (TAS) qui devrait être considéré comme une partie intégrante du processus de traitement des eaux usées municipales. Le TAS consiste en une alimentation séquentielle des bassins d'infiltration (bassins d'étalement) et en un passage contrôlé d'effluent à travers la zone insaturée et l'aquifère, principalement à des fins d'épuration, ainsi que pour le stockage saisonnier et pluriannuel. L'opération de recharge s'effectue au moyen de bassins d'étalement qui entourent des puits de récupération adéquatement espacés (pompage d'eau pour réutilisation indirecte) permettant de séparer la zone de rechargée du reste de l'aquifère.

Selon l'étude sur les « Exemples internationaux applicables au contexte tunisien », les facteurs de réussite généraux de la REUT aux échelles nationales des différents pays étudiés englobent :

- ✓ Des institutions opérationnelles et coordonnées ;
- ✓ Une délimitation des compétences et des responsabilités claire et renforcée au niveau de l'organisme(s) en charge de la gestion intégrée de la ressource en eau et de la REUT sur un territoire ;
- ✓ Une réglementation adaptée et évolutive mise au point ;
- ✓ Une politique de gestion intégrée des ressources en eau dans laquelle la REUT prend toute sa place ;
- ✓ Des systèmes de traitement adaptés et performants ;
- ✓ Des systèmes contrôlés et sécurisés ;
- ✓ Une acceptation publique à travers des campagnes de sensibilisation et de communication au public ;
- ✓ Une viabilité économique et financière des projets.

.

3 CHAPITRE 3 : LES SCENARIOS ET LEURS OUTPUT

3.1 MODELES PREVISIONNELS OFFRE/DEMANDE 2050 PAR REGION

Le scénario de base à savoir le scénario tendanciel a été développé à ce stade de l'étude. La démarche prospective a projeté la vision de différents scénarios (Voir partie prospective Vol.1). Il convient de maitriser le modèle et ses simulations. Nous avons mis en place un tableau de bord des équilibres hydrauliques par région (6 régions) qui permet de piloter le modèle.

Ci-dessous les Output des bilans offre et demande par région sans aucuns forçages ni sollicitations. Ces bilans « tendanciels » mettent en exergue les limites du système eau de la Tunisie qui préjugent d'un avenir incertain de la durabilité de ce système. Sauf des mesures radicales et de ruptures avec certaines pratiques du passé permettraient de changer profondément la gestion des ressources en eaux en passant d'une gestion de l'offre (de plus en plus limitée) à une gestion de la demande (dont la maitrise s'avère nécessaire).

.

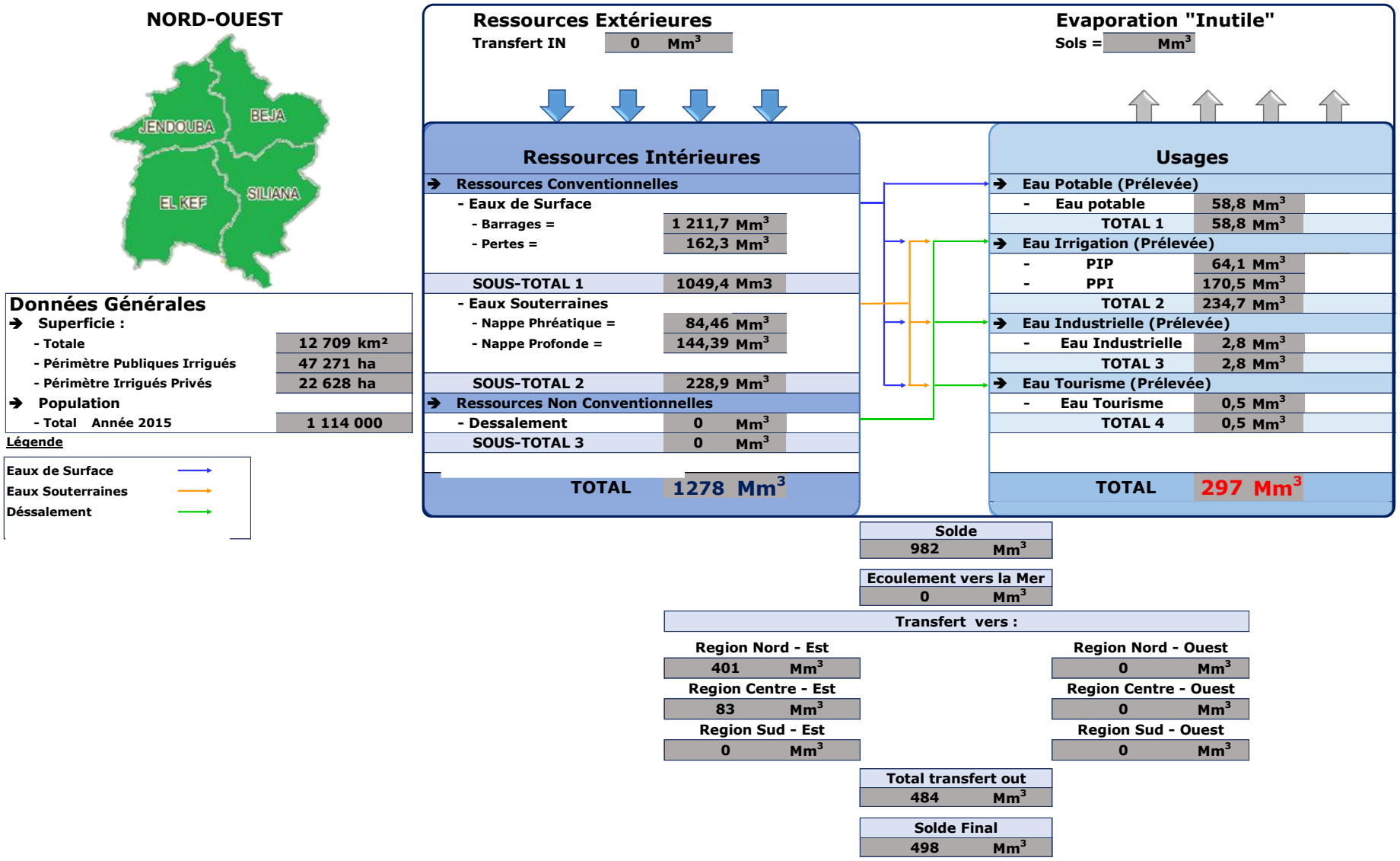


Figure 133 : Bilan 2050 région NORD-OUEST

Source : STUDI-EAU 2050

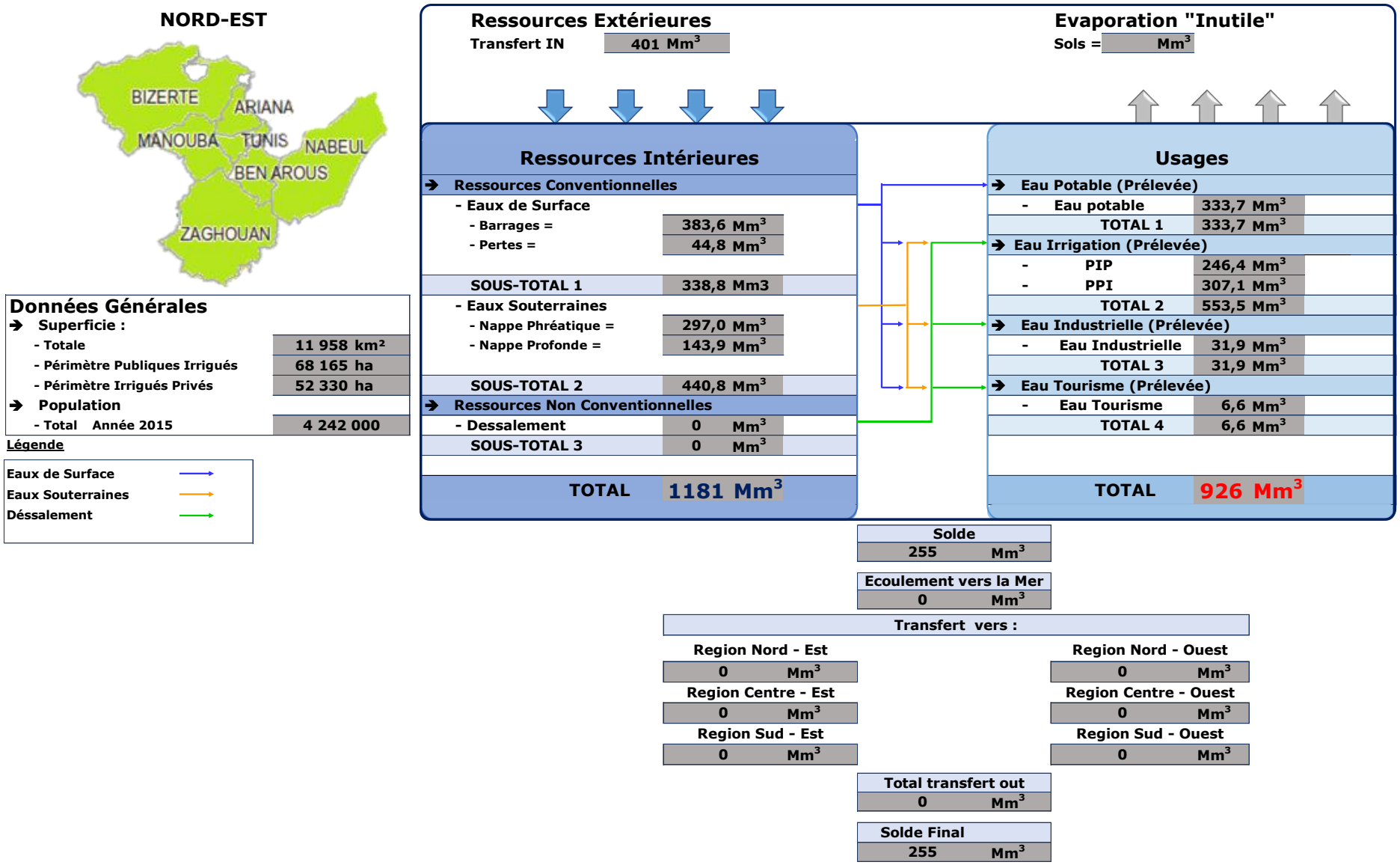


Figure 134 : Bilan 2050 région NORD-EST

Source : STUDI-EAU 2050

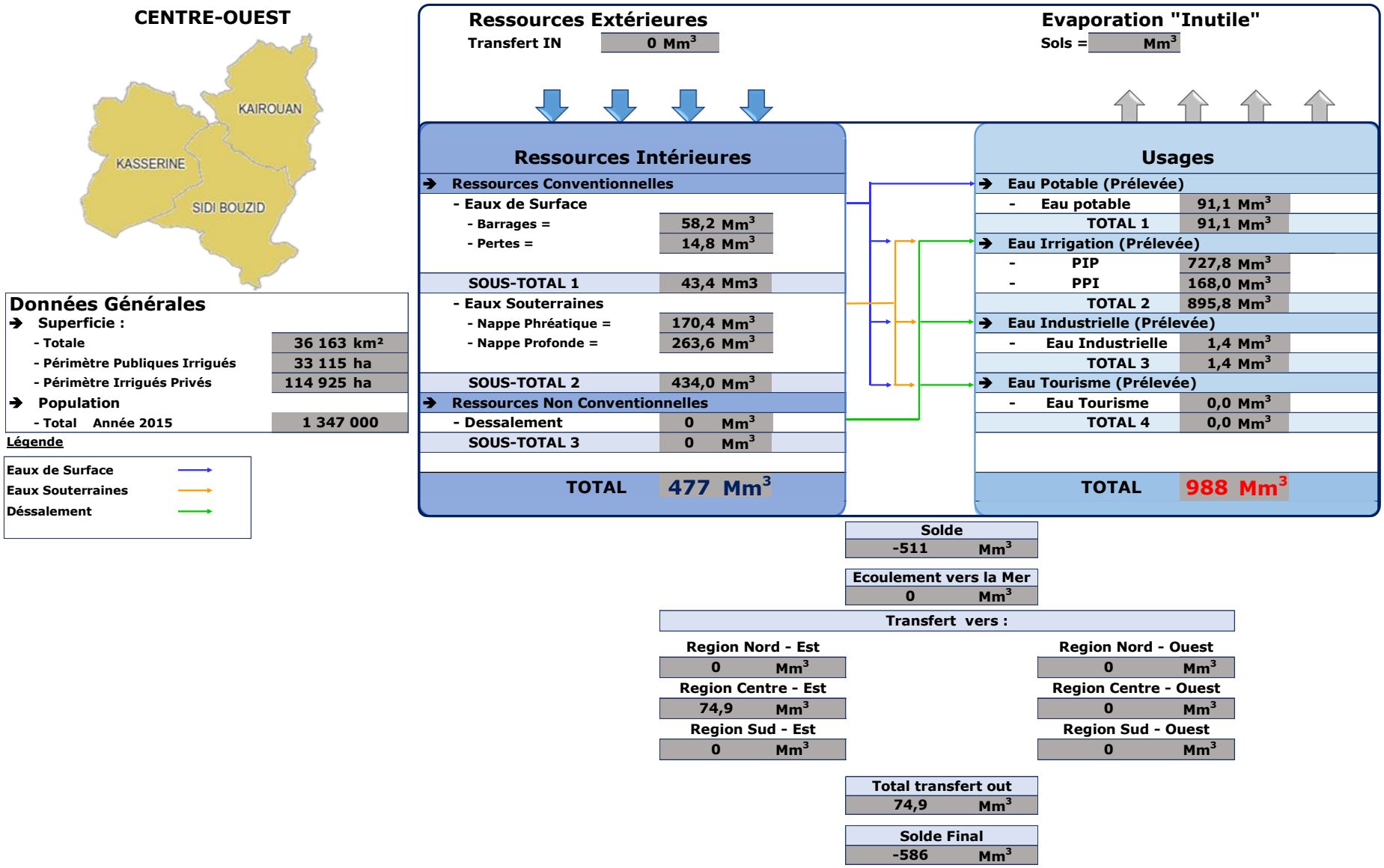


Figure 135 : Bilan 2050 région CENTRE-OUEST

Source : STUDI-EAU 2050

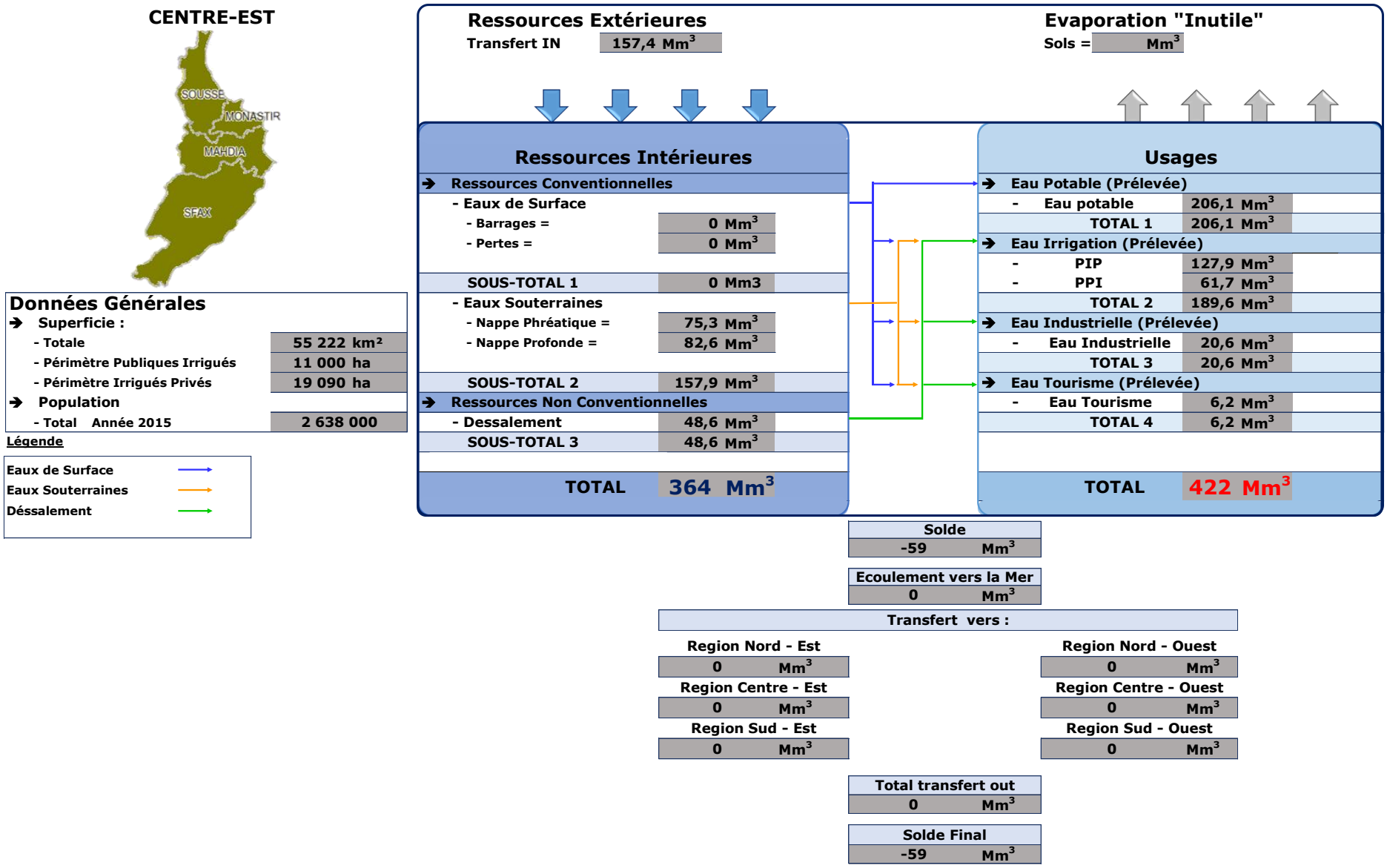


Figure 136 : Bilan 2050 région CENTRE-EST

Source : STUDI-EAU 2050

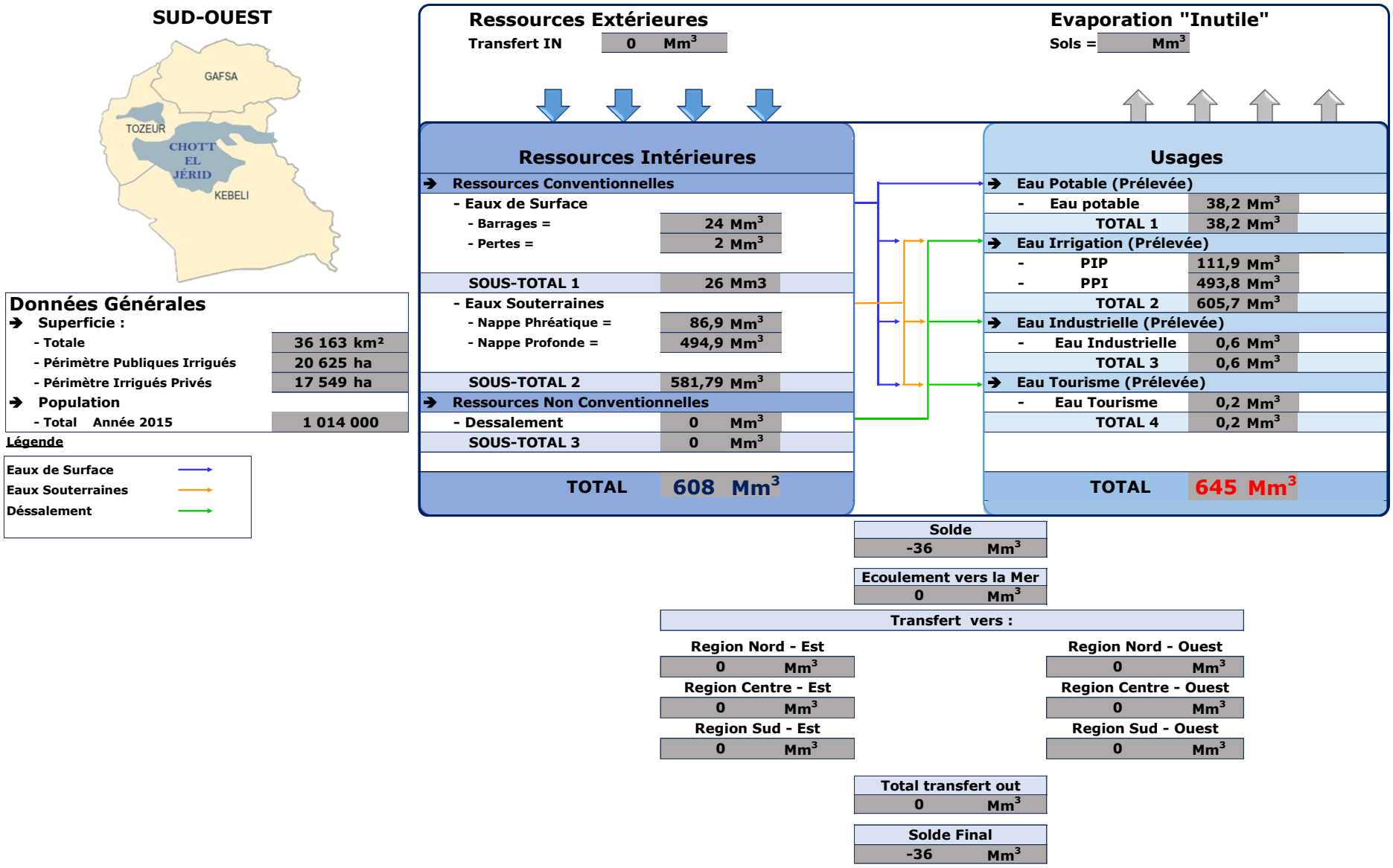


Figure 137 : Bilan 2050 région SUD-OUEST

Source : STUDI-EAU 2050

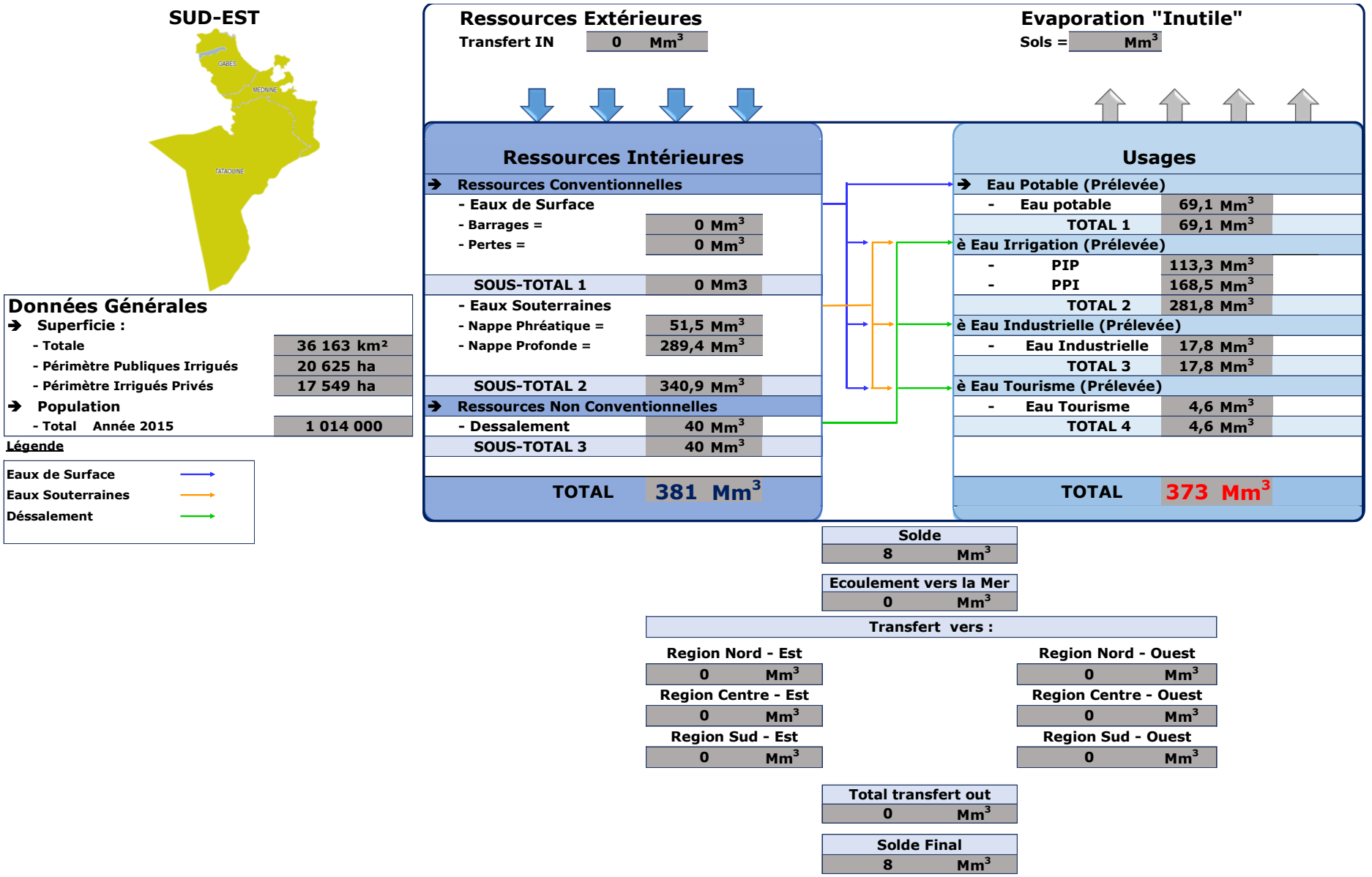


Figure 138 : Bilan 2050 région SUD-EST

Source : STUDI-EAU 2050

Bilan hydrique global à l'horizon 2050

Tableau 42 : Bilan hydrique global à l'horizon 2050

Régions	Prélèvements pour Usages en Mm³					Total Prélèvements pour usages	Ressources renouvelables potentielles en Mm³	Ressources potentielles nettes prélèvements pour usages
	Agriculture	Domestique	Industrie	Tourisme	Total Eau Potable			
NO	235	59	3	0	62	297	794	497
NE	553	334	32	7	373	926	1181	255
CO	896	91	1	0	92	988	402	-586
CE	190	206	21	6	233	423	315	-108
SO	606	38	1	0	39	645	608	-37
SE	282	69	18	5	92	374	341	-33
Total	**2762**	**797**	**76**	**19**	**892**	**3654**	**3641**	**-13**

Source : STUDI Eau 2050

Projection du bilan hydrique pour les périodes intermédiaires

Tableau 43 : Projection du bilan hydrique pour les périodes intermédiaires

Régions	Bilan (Res.-Prélèv.) en Mm3				
	2015	**2025**	**2030**	**2040**	**2050**
NO	645	721	593	694	497
NE	120	281	276	267	255
CO	-432	-554	-542	-557	-586
CE	-75	-64	-87	-102	-108
SO	-82	-61	-33	-36	-37
SE	-78	-17	-24	-28	-33
Total	**99**	**305**	**183**	**238**	**-13**

Source : STUDI Eau 2050

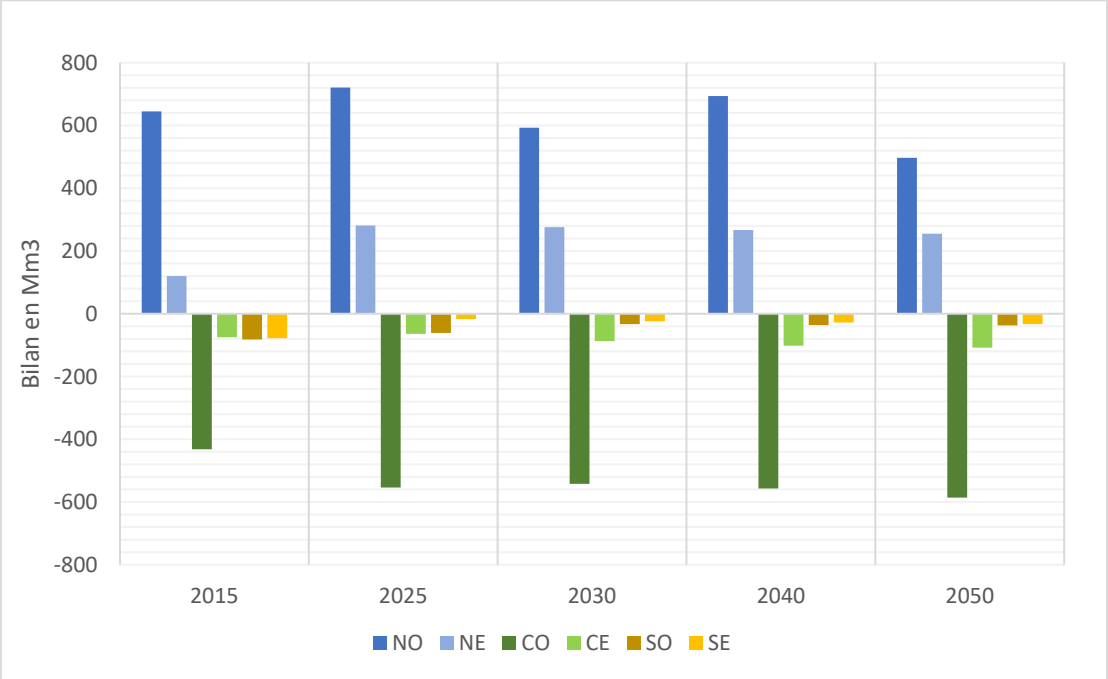


Figure 139 : Projection du bilan hydrique pour les périodes intermédiaires par région

Source : STUDI Eau 2050

3.2 NEXUS EAU, AGRICULTURE, ENERGIE

3.2.1 Situation énergétique en Tunisie

Le secteur énergétique Tunisien fait face à des défis multiples : stratégiques, économiques, sociaux et environnementaux. Ainsi, l'approvisionnement énergétique, notamment pour le secteur électrique, dépend essentiellement du gaz naturel (97% de l'énergie électrique produite), dont plus de la moitié provient de l'Algérie compte tenu des ressources nationales limitées. De plus, la demande d'électricité n'a cessé de croitre. De ce fait, le déficit de la balance d'énergie primaire n'a cessé de s'aggraver depuis une quinzaine d'années, atteignant les 50% en 2018.

La situation énergétique de la Tunisie est marquée par des ressources énergétiques limitées, une baisse de la production énergétique et un fort accroissement de la demande. Ce décalage entre la production énergétique et la demande nationale en hydrocarbures a fait apparaitre un déficit au niveau du bilan d'énergie primaire qui a atteint 49% en 2018 contre 15 % en 2010. A la fin 2018, le parc de production électrique a atteint une puissance installée de 5476 MW, dont 5005 MW appartenant à la STEG et 471MW à un seul producteur privé (Carthage Power Company). La production d'électricité est passée de 12091 GWh en 2005 à 18988 GWh en 2018, enregistrant un taux de croissance annuel moyen de 4%. Ce parc, essentiellement constitué de centrales thermiques, est le plus grand consommateur de gaz naturel. Au vu de la baisse de production de gaz naturel (-36% durant la période 2010-2018), cette forte dépendance à ce combustible pose désormais un sérieux problème quant à la sécurité de la production électrique. 97% de l'électricité est produite à partir du gaz naturel ; la part des énergies renouvelables n'a pas dépassé les 3%. Etant donné l'évolution des prix du gaz naturel, les tarifs de vente de l'électricité ont fait l'objet de plusieurs augmentations. Comparés aux tarifs de 2010, les augmentations ont été significatives et, exception faite des ménages à faible consommation (tarif social), ont touché tous les consommateurs d'électricité. A titre indicatif, les prix pratiqués de l'électricité aux entreprises raccordées au réseau moyenne tension et ayant souscrit au tarif uniforme ont enregistré une augmentation de l'ordre de 41% depuis 2010.

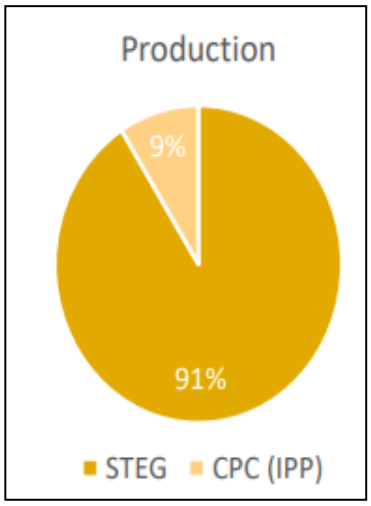


Figure **140** : Répartition de la production d'électricité

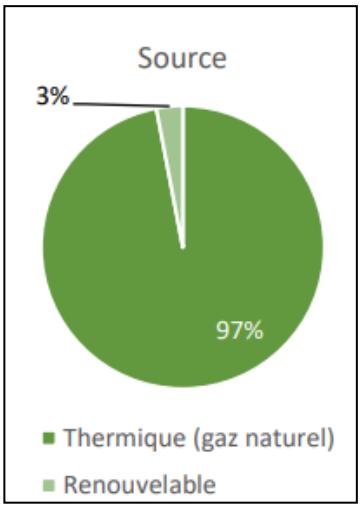


Figure **141** : Répartition des sources d'énérgie

Source : STUDI Eau 2050

Pour faire face à cette situation, la Tunisie a adopté une stratégie de transition énergétique qui constitue un axe fondamental de la politique énergétique en Tunisie surtout avec le creusement de déficit énergétique qui a dépassé les 4 Milliards de Dinars Tunisien en 2017 soit 25% du déficit commercial global de la Tunisie ce qui nécessite une accélération du processus d'introduction des énergies renouvelables dans le mix énergétique.

Le défi majeur serait d'assurer la sécurité d'approvisionnement énergétique du pays, avec une contribution minimale des énergies renouvelables de 30% à l'horizon 2030.

Cet objectif a pour conséquence la réduction de l'intensité carbone dans le mix énergétique qui est de 41% par rapport à l'année de base 2010, sur lequel la Tunisie s'est engagée lors du COP21 de Paris (La Tunisie a signé l'Accord de Paris lors du Sommet Mondial sur le Climat).

3.2.2 Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables ne sont plus un choix en soi, en effet, leur impact est tridimensionnel à savoir:

Economique : en permettant de baisser la facture énergétique d'une part mais de développer de nouvelles activités et de créer de l'emploi dédié, d'autre part
Environnemental : puisqu'il permettra de baisser les émissions de CO2, aujourd'hui un des facteurs principaux du réchauffement climatique (dont la Tunisie a pris des engagements vis à vis de la communauté internationale) ;
Social : en impactant positivement l'éducation, la santé, l'agriculture, l'accès à l'eau potable, l'information ou encore l'égalité des genres.

Malgré l'importance de ces ressources, les réalisations dans le domaine de la production d'électricité à partir des énergies renouvelables restent encore limitées en Tunisie, et se résument comme suit :

Tableau 44 : Production d'électricité à partir des énergies renouvelables

Technologie	Réalisations
Eolien	2 parcs totalisant une puissance de 245 MW au Nord de la Tunisie
Solaire PV	Puissance totale installée de 172 MWc répartie comme suit : 105 MWc accordés au réseau BT 26 MWc MT sous le régime des autorisations 2x10 MWc par la STEG, 1x10 MWc par la STEG 1x 10 MWc 1x1MWc Ennfidha
Hydroélectrique	Puissance globale de 67,1 MW

Selon les estimations de la Banque mondiale, la Tunisie reçoit entre 22 et 26% de l'ensemble des rayonnements solaires atteignant la terre (un taux d'ensoleillement important qui dépasse le 3000 heures par an et un indice d'irradiation direct (DNI) qui varie entre 2 kWh/m2 à l'extrême Nord et 6 kWh/m2 à l'extrême Sud). Cela se traduit par un potentiel d'énergie solaire par kilomètre carré par an équivalent à l'énergie générée par 1 à 2 millions de barils de pétrole. En outre, selon le World Energy Outlook publié par l'Agence internationale de l'énergie (IEA), la part des énergies renouvelables dans la production totale d'électricité dans le monde devrait atteindre 43% (solaire) et 16 % (éolien) en 2040 ainsi elle affirme qu'il y'aura une baisse de 50% des prix des renouvelable dans le monde en 2040, et que « Le solaire est dorénavant l'électricité la moins chère de l'Histoire (coût actuel du PV en 2019 est de $20/MWh)

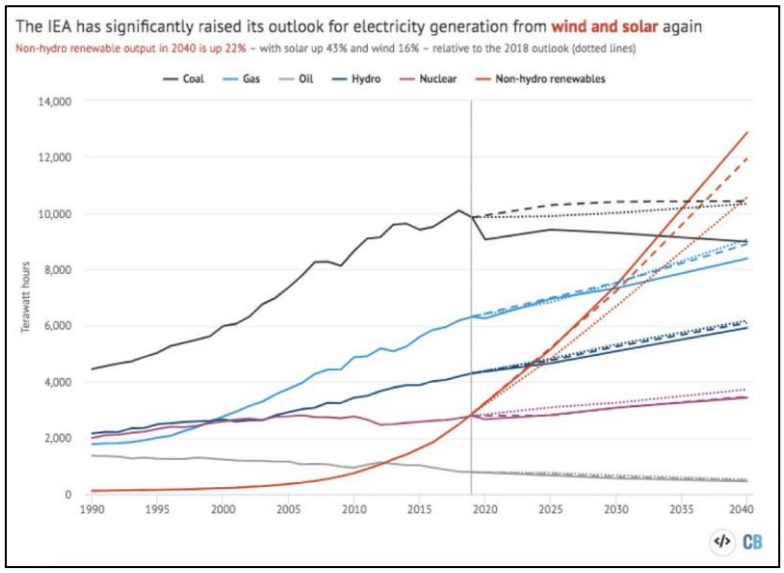


Figure 142 : Baisse des coûts des modules PV entre 2008-2020

Source : STUDI Eau 2050

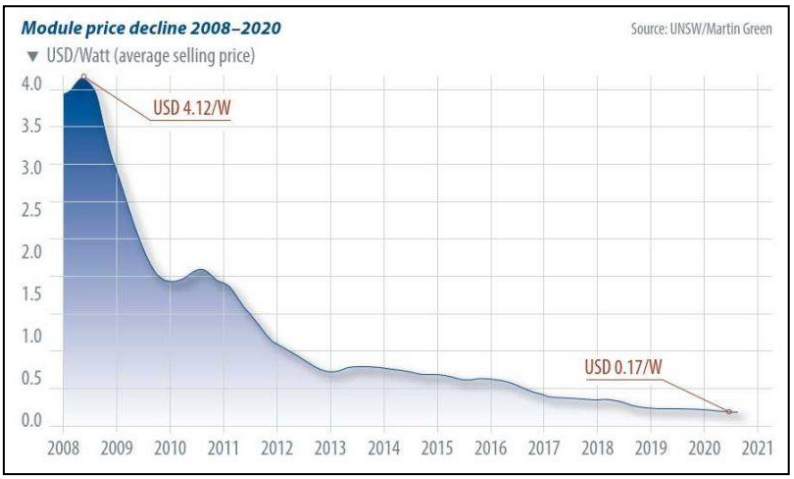


Figure 143 : Baisse des prix des modules pv 2008-2020

Source : STUDI Eau 2050

La production d'électricité par la filière photovoltaïque a été développée en Tunisie par la mise en place d'un Plan Solaire Tunisien PST qui a pour but d'atteindre l'objectif de la politique de transition énergétique en termes de pénétration des ENRs en Tunisie.

Le scénario de développement retenu, dit "volontariste", vise à porter la part des énergies renouvelables dans la production d'électricité de 50% en 2050, avec un objectif intermédiaire de 30% en 2030.

Tableau 45 : Evolution des ressources renouvelables en Tunisie

	2020	2025	2030	2040	2050
Taux de pénétration EnR	3%	24%	30%	40%	50%
Solaire P	172 MWc	1376 MWc	1720 MWc	2293 MWc	2866 MWc
Eolien	245 MW	1404 MW	1755 MW	2340 MW	2925 MW
Hydroélectrique	67 MW				

Source : STUDI Eau 2050

3.2.3 Eau & Energie

3.2.3.1 Pompage

L'adduction de l'Eau à partir de la Réserve d'Eau et le Pompage permettent d'adapter l'Eau disponible à l'exploitation quelle que soit son utilisation (Irrigation, Eau Potable, Industrie, tourisme, etc.).

Le nombre des puits équipés pour l'irrigation et l'eau potable totalisent 1000 unités parmi un total 50 000 puits, la puissance installée est de 3 MWc. Les puits pouvant être potentiellement équipés en pompage solaire sont essentiellement les forages (profondeur maximale 50 m) et les puits de surface. Le potentiel est estimé à 83 000 puits en 2030. Le scénario de développement retenu, dit "volontariste", prévoit d'équiper 36% de ces puits d'ici 2030.

D'où le scénario de développement envisagé pour le pompage PV est l'équipement achevé à de 30 000 puits à l'horizon 2030, ce qui porterait la puissance totale installée à environ 90 MWc et 150 MWc en 2050.

Tableau 46 : Evolution du pompage PV en Tunisie

	2020	2025	2030	2040	2050
Evolution des puits équipés		25%	36 %	40%	50%
Nombre des puits non équipés	50 000	60 000	83 000	87 000	100 000
Nombre des puits équipés	1000	15 000	30 000	35 000	50 000
Puissance installée	3 MWc	45 MWc	90 MWc	105 MWc	150 MWc

Source : STUDI Eau 2050

3.2.3.2 Systèmes de stockage d'électricité

Dans le concept de réseaux intelligents, les technologies de stockage d'électricité jouent un rôle très important. Ces « réservoirs » d'électricité peuvent délivrer de l'électricité ou en emmagasiner et sont utilisés pour niveler la courbe de charge, absorber les pointes de production renouvelable et fournir de la capacité de réserve. Généralement, on différencie les systèmes de stockage mécaniques (hydro-électrique pompage-turbinage, air comprimé, volant d'inertie) et électrochimiques (batteries, super-condensateurs, hydrogène).

Chaque technologie de stockage a ses caractéristiques spécifiques classées selon les critères suivants : puissance (en MW), capacité de stockage (MWh), flexibilité (temps de réaction), rendement et durée de vie (en cycles). Ces critères déterminent aussi leur champ d'application. Les super-condensateurs, très couteux, mais capables de fournir de l'électricité très rapidement, pourront être utilisés pour garantir la régulation à échelle des quelques (milli-)secondes. Quant aux systèmes à air comprimé ou les centrales à pompage-turbinage hydraulique, ces dispositifs sont plutôt conçus pour compenser des fluctuations sur des périodes plus longues.

Actuellement, la technologie de turbinage-pompage est la plus répandue au monde, totalisant une capacité installée de 100 GW.

Les systèmes électrochimiques sont toujours peu utilisés vu leurs prix élevés (voir Tableau 47). Néanmoins, une baisse importante des coûts est probable suite aux innovations majeures sur le marché.

Tableau 47 : Caractéristiques des différentes technologies de stockage

Type	Technologie	Coûts par capacité de stockage (€/MWh)	Coûts par puissance installée (€/kW)	Cycles	Rendement (%)
Mécanique	Pompage-turbinage	60-150	500	20000-50000	70-85
	Air comprimé	30-120	550	9000-20000	70–80
	Volant d'inertie	1000-3000	300	20000-60000	90-95
Electro-chimique	Super-condensateurs	3800-4000	100-400	10000-100000	95-100
	Nickel-cadmium	350-800	175	1000-3000	60-70
	Sodium-soufre	200-900	150	2000-3000	85-90
	Lithium-ion	200-500	175	3000-6000	95-100
	Vanadium	100-1000	175	2000-3000	75-85
	Zinc-Brome	50-400	175	>2000	70
	Plomb	50-300	175	200-1100	75

Source : STUDI Eau 2050

3.2.3.3 Prévisions et nouvelles technologies

Stockage solaire :

Le développement du solaire va s'accélérer les prochaines années jusqu'à l'horizon 2050, boosté par une baisse très rapide des prix, qui le rend concurrentiel par rapport aux énergies fossiles, couplée à l'amélioration des performances.

Pour les batteries, l'évolution est identique, baisse des prix, accroissement des performances, investissements massifs dans l'industrialisation, les statistiques techniques, économiques et financières de l'essor du stockage suivent les mêmes courbes que celles du photovoltaïque. Il y aura une division par deux des prix du kWh stocké d'ici 2023 et le remplacement du cobalt des batteries par des nanoparticules de silicium, matériau abondant et peu couteux, comme pour les cellules solaires. Le solaire, à partir du moment où le stockage sera performant va contribuer à diminuer l'impact des énergies carbonées sur les changements climatiques. Le couple solaire-stockage constitue « la rupture technologique » qui représente une clé de l'avenir énergétique mondial et particulièrement de la Tunisie.

Stockage d'énergie à hydrogène solaire « Power to X »

Les technologies " Power to X " désignent, en effet, la reconversion de l'électricité en un autre vecteur énergétique ou son stockage. Elles consistent à utiliser l'excédent de production issu des énergies renouvelables pour produire des vecteurs énergétiques liquides ou gazeux comme l'hydrogène, le méthane ou le méthanol par conversion électrochimique.

Le stockage d'énergie par l'hydrogène est une des solutions pour gérer les futurs surplus de production d'électricité. Les technologies Power to X permettent également de gérer l'intermittence des énergies renouvelables à travers le stockage intermédiaire de l'énergie générée lors de phases productives, afin de compenser les phases de faible production, ce qui permettra d'équilibrer l'offre et la demande d'énergie,

d'améliorer la gestion des charges et de générer des produits de remplacement aux produits issus des énergies fossiles utilisés dans l'industrie.

Comme combustible solaire, l'hydrogène semble très idéal. Celui-ci peut servir de carburant aux machines thermiques grâce à son pouvoir énergétique élevé. Les progrès des piles à combustibles permettent aussi de produire, par combustion électrochimique de l'hydrogène, de l'électricité avec des rendements de 70 %.

La combustion de l'hydrogène avec l'oxygène donne de l'eau sous forme vapeur. Cette vapeur d'eau peut être avantageusement recyclée pour obtenir l'hydrogène. Avec l'air, la combustion dégage des oxydes d'azote. Deluchi a comparé les résultats de plusieurs études d'application de moteurs à combustion interne et a montré que pour l'hydrogène, les quantités rejetées restent inférieures à celles pouvant résulter de l'utilisation de l'essence ou du carburant Diesel. L'utilisation de l'hydrogène est donc écologique.

Il faut enfin noter que, de l'avis des experts, le système d'énergie à hydrogène solaire évoqué ne pourra remplacer les ressources actuelles, qu'après une période de transition (Horizon 2035). En effet, diverses études indiquent que le recours au stockage ne devient nécessaire que lorsqu'on atteint 40-50 % voire 60 % d'énergie renouvelable intermittente alimentant le réseau, ce qui est une situation envisageable en 2030.

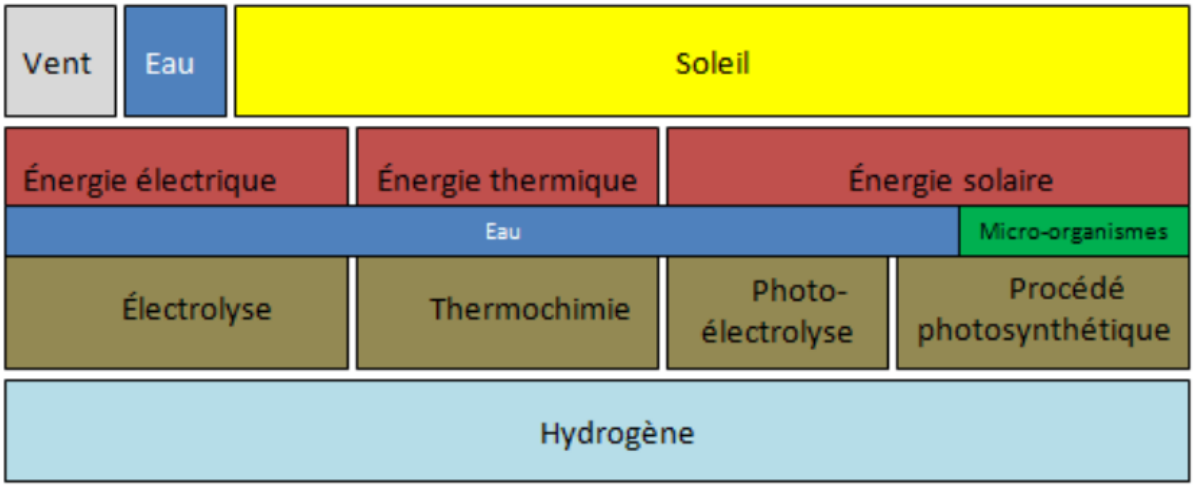


Figure 144 : Différentes chaînes de production d'hydrogène "vert

Source : STUDI Eau 2050

Le Département de l'Énergie des Etats-Unis a mené une étude d'évolution des coûts de l'hydrogène en fonction de différents facteurs39. La simulation se base sur une centrale solaire thermodynamique à concentration de 13km² possédant une capacité de production de 100 tonnes d'hydrogène par jour (Tableau 48).

Tableau 48 : Synthèse étude Département de l'Énergie

Facteurs	Rendement	Durée de vie des matériaux	Baisse du coût du réacteur	Coût du solaire concentré	Coût en $/kg	Coût en €/kg
2015	6,2%	1 an	-	140$/m²	35,22	27,1
2020	16,7%	5 ans	30% par rapport à 2015	75$/m²	8,56	6,6
2030-2050	34,3%	10 ans	30% par rapport à 2020	-	3,84	2,95

Source : STUDI Eau 2050

Stockage Pompage Turbinage STEP :

Avec le développement des centrales éoliennes et solaires et leur introduction progressive dans le réseau électrique, l'affinage des techniques de stockage thermiques et électrochimiques est devenu un enjeu crucial, la modernisation des technologies de stockage mécaniques type STEP l'est tout autant. « Depuis une dizaine d'années, les STEP sont utilisées de manière beaucoup plus dynamique : là où on les démarrait pendant la nuit pour pomper et la journée pour turbiner, dans beaucoup de pays.

Estimant qu'il serait nécessaire de développer une capacité supplémentaire 8 fois plus grande que la capacité actuelle, donc avoir 530 GWh/an au lieu de 66 000 MWh/an d'ici 2050 et ce en maximisant la production par O&M et par l'arrêt de transfert des eaux de nord.

3.2.4 Impact de changement climatique sur les ressources en eau

Les interrelations entre le système climatique et le cycle de l'eau sont nombreux et d'une redoutable complexité. La montée des températures et la réduction des précipitations ainsi que leur intensité et leur fréquence affectent simultanément les différentes composantes des systèmes hydrologiques.

L'irrégularité au niveau des apports en eau de surface s'accentuera dans le futur du fait du changement climatique. En effet, les différents scénarios climatiques prévoient en plus de l'augmentation de la température et la réduction de la pluviométrie, des événements extrêmes de plus en plus abondants et des sécheresses plus longues.

Tous ces facteurs auront un impact différencié sur les apports en eau des bassins hydrologiques. Les apports d'eau par bassin sont estimés, pour les différentes échéances, par l'approche du bilan fournit par des modèles pluie-débit sous forme de formulations mathématiques reliant le débit (Q) à la pluie (P) et l'évapotranspiration potentielle (E) qui a été est calculée avec la formule de Turc. Les apports en eau par bassin ont été calculés avec les trois formules empiriques de Tixeront, de Turc et de Schreiber. Les résultats de ces modèles montrent une nette diminution des apports en eau dans les différents bassins qui varie selon les scénarios de 25 à 36% à l'horizon 2050 et de 31 à 61% à l'horizon 2100.

Tableau 49 : Apports d'eau calculés selon les différentes formules d'estimation des écoulements

Formules des écoulements	Horizons / Apports	Période de référence	RCP 4.5		RCP 8.5		Valeur officielle du MARHP
			2050	2100	2050	2100	
Schreiber	Apport Mm^3	2329	1485	1426	1604	909	2700Mm^3
	Indice	100	64	61	69	39	
Turc	Apport Mm^3	2080	1472	1426	1562	1016	
	Indice	100	71	69	75	49	
Tixeront	Apport Mm^3	1589	1084	1051	1158	734	
	Indice	100	68	66	73	46	

Source : STUDI Eau 2050

Par conséquent, les ressources en eau de surface pourraient passer de 2700 Mm^3 en moyenne actuellement à moins de 1600 Mm^3 en 2050 et à moins de 1400 Mm^3 en 2100.

En considérant uniquement l'élévation de température et en prenant une pluviométrie constante jusqu'à 2100, les écoulements baisseraient de 7 à 11% en 2050 et de 9 à 20% en 2100. Ainsi nous constatons que le tiers de la diminution des écoulements est dû à l'augmentation de l'évapotranspiration et les deux tiers reviennent à la diminution de la quantité de pluie.

Pour les eaux souterraines et en considérant l'étroite relation entre les écoulements de surface et l'infiltration, l'hypothèse prise est que le taux de variation des volumes infiltrés seraient équivalents à celui des eaux d'écoulement de surface. Seules les nappes à ressources renouvelables sont affectées par le changement climatique, les réserves en eau des nappes du Sahara septentrional ne seront concernées que par l'augmentation de la demande en eau.[51]

Les eaux souterraines renouvelables pourraient passer de 1524 Mm^3 actuellement à pratiquement 1000 Mm^3 en 2050 et 700 Mm^3 en 2100, soit la moitié des ressources actuelles. Au niveau des nappes côtières les pertes seront plus importantes suite à l'élévation du niveau de la mer et pourraient atteindre 50% de leurs ressources en 2050 et beaucoup plus en 2100. Sous l'effet conjugué de la demande et du changement climatique, le phénomène de surexploitation va s'accentuer et une grande partie des prélèvements sera prise sur les réserves géologiques des nappes avec toutes les conséquences sur la qualité des eaux et la durabilité de la ressource.

[51] Rapport Eau, Rachid KHANFIR

L'impact du changement climatique pourrait être très important sur les ressources en eaux renouvelables, les volumes d'eau disponibles vont beaucoup diminuer d'ici 2050 et encore plus en 2100. Le quota en ressources renouvelables par habitant et par an passe de 366 m^3 actuellement à 200 m^3 en 2050 et moins de 150 m^3 en 2100.

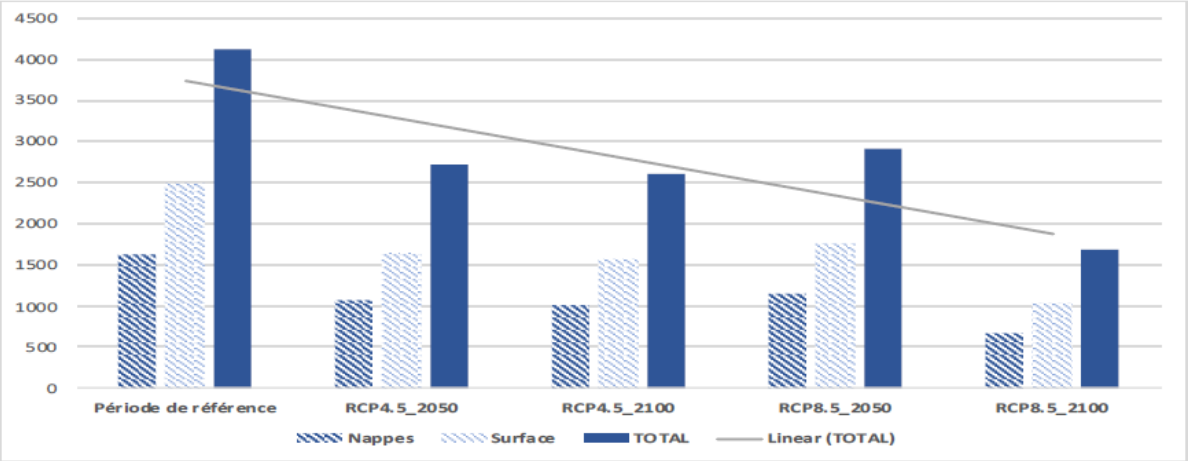


Figure 145 : Evolution des ressources en eau de surface et souterraine selon scénarios RCP 4.5 et 8.5

Source : STUDI Eau 2050

3.2.5 Stratégie CES comme un forçage de résilience aux changements climatiques

Les différents modèles et prévisions climatiques indiquent une élévation probable des températures, et une baisse des précipitations moyennes annuelles. Ces modifications du climat pourront avoir comme conséquences : [52]

Une augmentation de l'érosion hydrique (notamment si on observe une augmentation des épisodes de pluie extrême et de crue, et une réduction du couvert végétal – principal facteur d'érosion dans le Sud et le Centre du pays) ;
Une baisse de la disponibilité des ressources en eau déjà en situation de rareté (baisse des apports pluviométriques et augmentation des prélèvements pour l'AEP et pour l'agriculture) ;
Des perturbations fortes du secteur agricole (réduction des surfaces à aptitude élevée pour l'oléiculture, augmentation de la vulnérabilité et des dégradations du système alfatier, et plus largement, réduction des surfaces cultivables et modification de la répartition géographique des cultures) ;
Une augmentation de la vulnérabilité des écosystèmes, qui présentent déjà un état de dégradation souvent avancé à cause des pressions anthropiques ;
Une augmentation probable des désastres naturels impactant les villes et les infrastructures, en particulier sur les zones littorales ;

Les actions menées dans le cadre de la CES peuvent permettre de mitiger certains effets du changement climatique, en particulier :

Lutter contre l'érosion hydrique et la perte de terres agricoles (conservation de la couverture du sol, en agriculture et parcours) ;
Conserver voire augmenter les réserves en eau (réduction de l'envasement des grands barrages, petits ouvrages de stockage, meilleure capacité de stockage de l'eau dans les sols si amélioration de la qualité des sols, recharge des nappes) ;
Limiter les impacts sur l'agriculture, à travers l'adaptation des techniques culturales (semis direct, choix des espèces et variétés cultivées, agroécologie, etc.), l'amélioration de la disponibilité de l'eau (petits ouvrages de stockage, qualité du sol et eau verte, etc.) et l'adaptation des techniques pastorales (amélioration des ressources fourragères et réduction de la pression sur les parcours).

L'élaboration de la nouvelle stratégie de l'ACTA fait suite à une longue histoire de la CES. Après la réalisation d'ouvrages par la population rurale depuis plus de 2000 ans (techniques ancestrales de collecte

[52] Elaboration de la Stratégie de Conservation des Eaux et des Sols de la Tunisie, Grp. BRL ingénierie et STUDI, 2017

des eaux et de limitation de l'érosion, tels que les tabias, jessours, meskats, etc.), l'Etat a commencé à intervenir pour lutter contre l'érosion dans les années 60. Ainsi, les services de l'Etat ont accumulé près de 60 ans d'expertise dans le domaine.

Les deux dernières stratégies de CES, respectivement programmées sur les décennies 1990-2001 et 2002-2011, correspondent à l'identification de la CES comme un secteur à part entière, formalisé par la création d'une direction de la CES en 1984, transformée en direction générale de l'ACTA en 2001.

Bien que les objectifs inscrits dans ces 2 stratégies de CES n'aient pas été atteints et que les problèmes de CES soient loin d'être endigués, il convient de souligner les efforts réalisés et les acquis de l'ACTA : [53]

En particulier, près de 7000 ouvrages variés ont été construits (voir tableau ci-après) : lacs collinaires, banquettes, tabias, ouvrages de recharge et d'épandage, etc. Les ouvrages surfaciques ont ainsi permis de traiter plus de 1,5 millions d'hectares contre l'érosion, sur 7,6 millions d'hectares de sols de sensibilité à l'érosion hydrique moyenne à très forte.

La Tunisie présente ainsi un référentiel technique internationalement reconnu dans le domaine de la CES ;

Bien que la recherche dans le domaine soit encore insuffisante et que les bases de données se révèlent parfois incomplètes (notamment, localisation géographique des travaux réalisés par l'ACTA), la Tunisie dispose de nombreuses études nationales et régionales sur l'érosion hydrique, la recharge des nappes, etc. et un important effort de planification des interventions a été réalisé lors des deux dernières stratégies de CES ;

La construction de la nouvelle stratégie de l'ACTA intervient également après une longue évolution des approches de l'Administration : l'interventionnisme de l'administration sur le terrain a laissé place à des modes d'actions centrés sur la concertation et la participation de la population, soutenus par les bailleurs et expérimentés dans le cadre de nombreux projets. Aujourd'hui, la tendance est à l'intégration des actions de CES dans les processus de gestion des ressources naturelles et de développement rural (« CES productive »).

Tableau 50 : Réalisations des stratégies de CES de 1990 à 2011

Types d'ouvrages	Stratégie CES (1990-2001)	Stratégie CES (2002-2011)	Total
Aménagement des bassins versants (Banquettes, tabias, seuils, etc.(ha)	892 034	640 829	1.532.263
Entretien et sauvegarde (ha)	338.496	315.633	654.129
Techniques douces (ha)	70.404	6.629	77.033
Lacs collinaires (unités)	580	195	775
Ouvrages de recharge (unités)	2533	2263	4796
Ouvrages d'épandage (unités)	1031	475	1506

Source : STUDI Eau 2050

La nouvelle stratégie, élaborée en 2017, s'est fixée comme objectif " de soutenir l'amélioration de l'agriculture pluviale, d'intégrer l'adaptation au changement climatique, de cibler les zones d'intervention en termes de sensibilité et d'effectuer des ajustements techniques..." En fait, l'agriculture pluviale, désignée parfois sous l'appellation "eau verte" est un point fort sur lequel il convient de s'appuyer. C'est un moyen de régulation inestimable dans la gestion de la demande en eaux, en contribuant davantage à la sécurité alimentaire du pays (production de céréales, fruits, légumes, huile en sec, en plus de l'élevage extensif) et en allégeant la pression sur les ressources des nappes surexploitées pour l'irrigation. Les ouvrages de CES, par leur diversité et leur répartition spatiale, peuvent atténuer la vulnérabilité des territoires en améliorant leur résilience. La CES est réellement un moyen d'adaptation au changement climatique et d'atténuation de ses effets : En cas de pluies exceptionnelles, les ouvrages de CES contribuent au contrôle

[53] Elaboration de la Stratégie de Conservation des Eaux et des Sols de la Tunisie, Grp. BRL ingénierie et STUDI, 2017

du ruissellement, au stockage de l'eau, à la recharge des nappes et protègent le sol contre l'érosion et améliorent son couvert végétal naturel.

En période de sécheresse prolongée et de vagues de chaleur, les ouvrages de CES pourraient constituer les premiers secours pour l'agriculture familiale (la plus vulnérable dans pareille situation), par les réserves fourragères, les pâturages améliorés, les points d'eau réalisés dans le cadre de projets antérieurs. La protection de la biodiversité peut prendre tout son sens, quand il s'agit de protection du couvert végétal naturel, même en zones de cultures céréalières, à travers l'adoption de la technique du semi-direct, de la revégétalisation des terres dégradées, de la création et préservation des zones humides générées par les retenues des barrages, etc.

Les actions doivent être ciblées selon les niveaux de vulnérabilité physique (priorisation selon l'urgence d'intervention face aux processus érosifs par exemple) et la vulnérabilité sociale car les petites exploitations familiales et les populations rurales pauvres sont socialement et économiquement les plus vulnérables, mais aussi celles qui recourent le plus, surtout en période de crise (climatique ou autre) aux ressources du milieu pour en tirer survie.

La territorialisation est un processus continu de construction et de reconstruction des territoires par des acteurs. L'Etat (à travers sa politique de CES en question ici), en est un, très important, mais qui ne doit pas ignorer les rôles des autres acteurs, et principalement les populations occupant le territoire ciblé par l'aménagement. Les PADIT (Plans d'Aménagement et de Développement Intégré des Territoires), préconisés par la Stratégie Nationale de CES, constituent un changement radical dans les modes d'intervention et une rupture avec l'approche techniciste parfois adoptée (de la conception à la réalisation des projets de CES). En effet, le PADIT sont conçus sur la base des initiatives des populations rurales locales, qui participent aussi à leur pilotage et suggèrent éventuellement des ajustements à mi-parcours. L'aménagement et le développement intégré des territoires, comme la formulation l'indique clairement, ne doit pas comporter uniquement la CES, mais celle-ci doit-être associée à d'autres actions de développement économique et social.

3.2.6 Les pressions

Les facteurs de pression et de stress hydrique sont susceptibles d'augmenter les prochaines années avec pour cause :

Le Citoyen : par sa demande en eau de plus en plus forte et par sa volonté d'extension de sa production ;
L'Etat : par une politique extensive des surfaces irriguées malgré les limites des ressources en eau renouvelables, mobilisables, régularisables.

Ceci a pour corollaire :

L'expansion des PI au-delà des ressources disponibles ;
L'accroissement de tissu urbain au détriment des terres agricoles.

Tendance des surfaces irriguées

Une tendance significative à l'extension des surfaces des périmètres irriguées ente 2002 et 2018 de 8500 ha/ an en moyenne (60% pour les PIP et 40% pour les PPI).

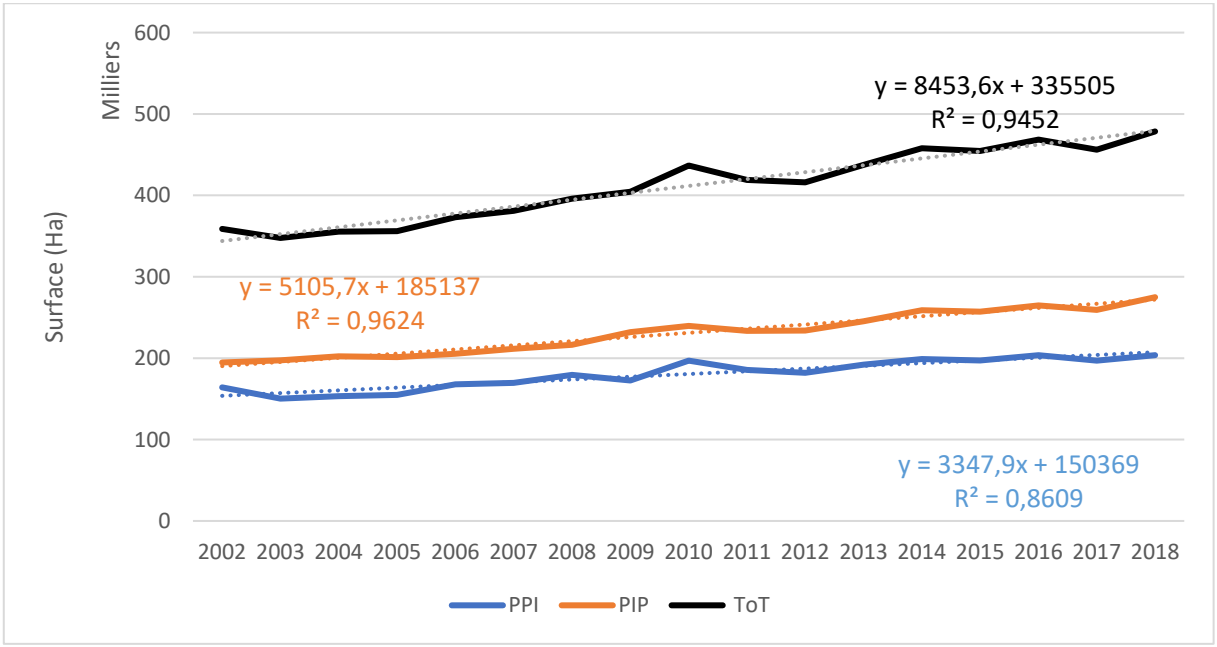


Figure 146 : Tendance d'extension des surfaces irriguées à l'échelle nationale

Source : MARHPM traitement STUDI

Une tendance significative à la hausse des extensions des périmètres irriguées dans les régions centre ouest (3200 ha/an dont 80% sont des extensions des PIP), sud-ouest (2000 ha/an dont 70% sont des extensions des PIP) et le sud-est (1300 ha/an dont 60 % sont des PIP).

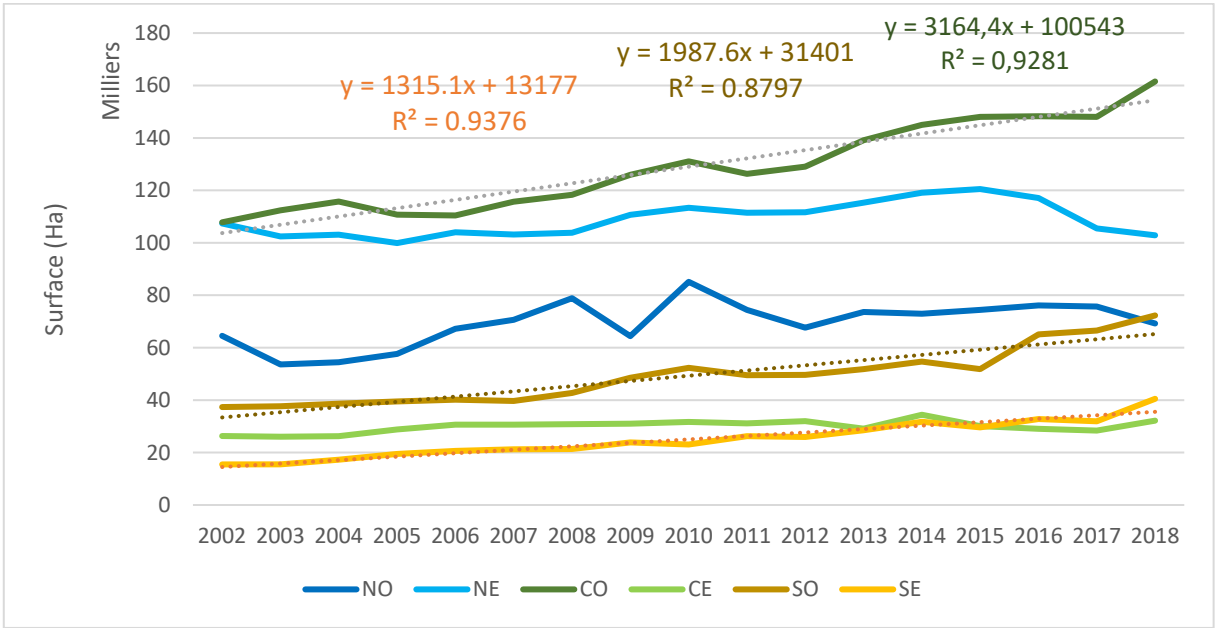
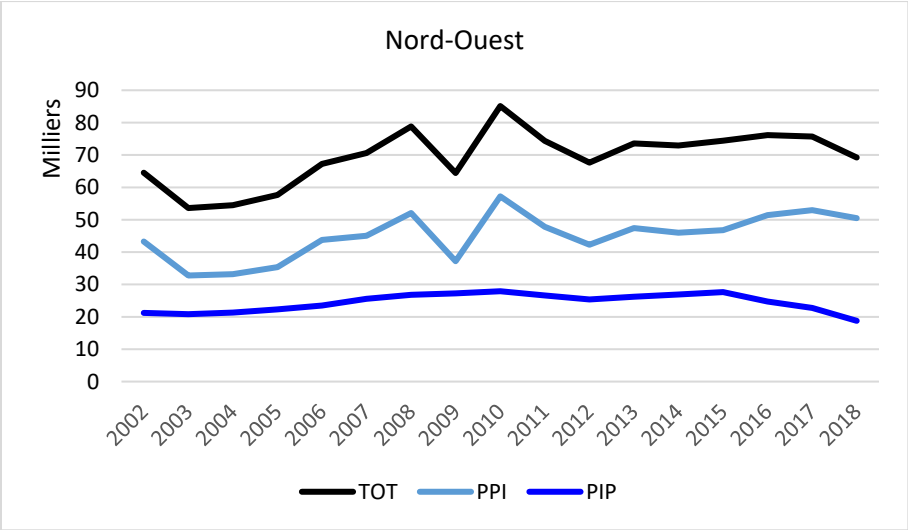
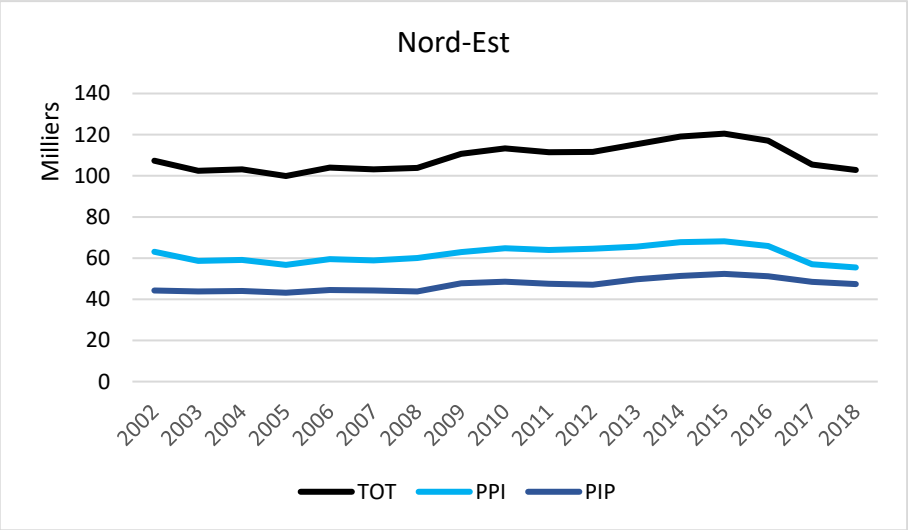
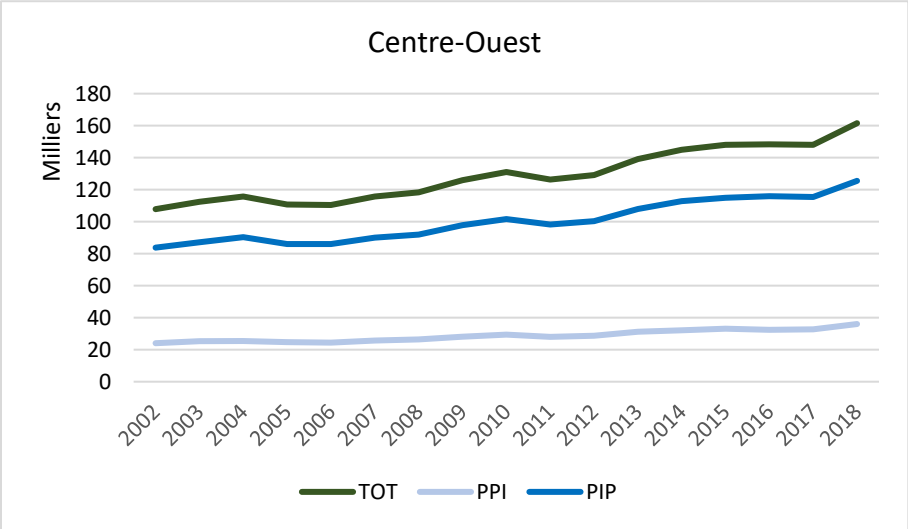


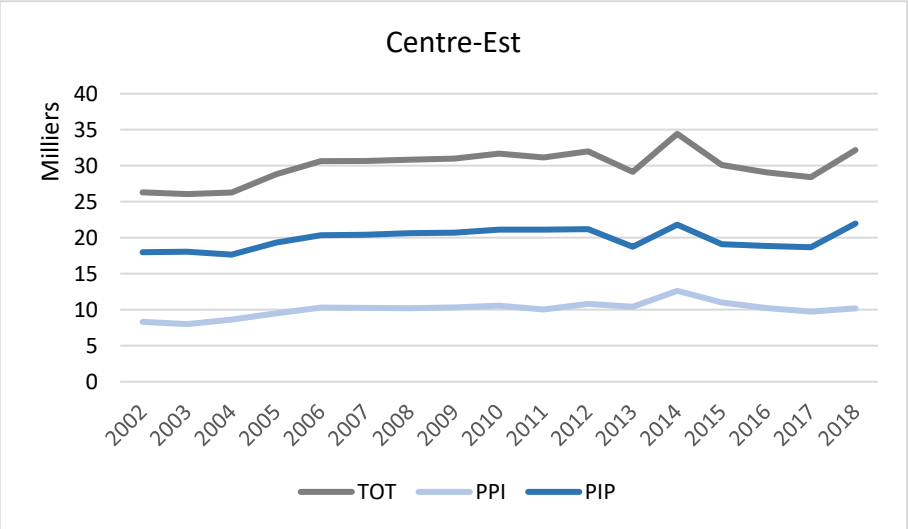
Figure 147 : Tendance d'extension des surfaces irriguées par région

Source : MARHPM traitement STUDI


Nord-Ouest
Milliers
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017 2018
TOT
PPI
PIP


Nord-Est
Milliers
140
120
100
80
60
40
20
0
2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017 2018
TOT
PPI
PIP


Centre-Ouest
Milliers
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017 2018
TOT
PPI
PIP


Centre-Est
Milliers
40
35
30
25
20
15
10
5
0
2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017 2018
TOT
PPI
PIP

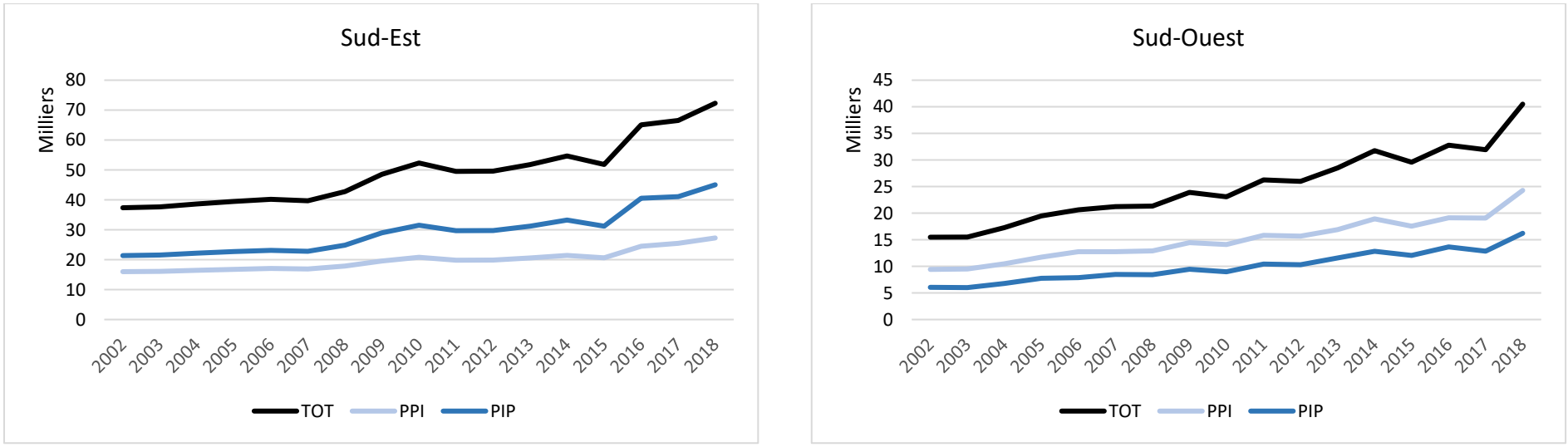
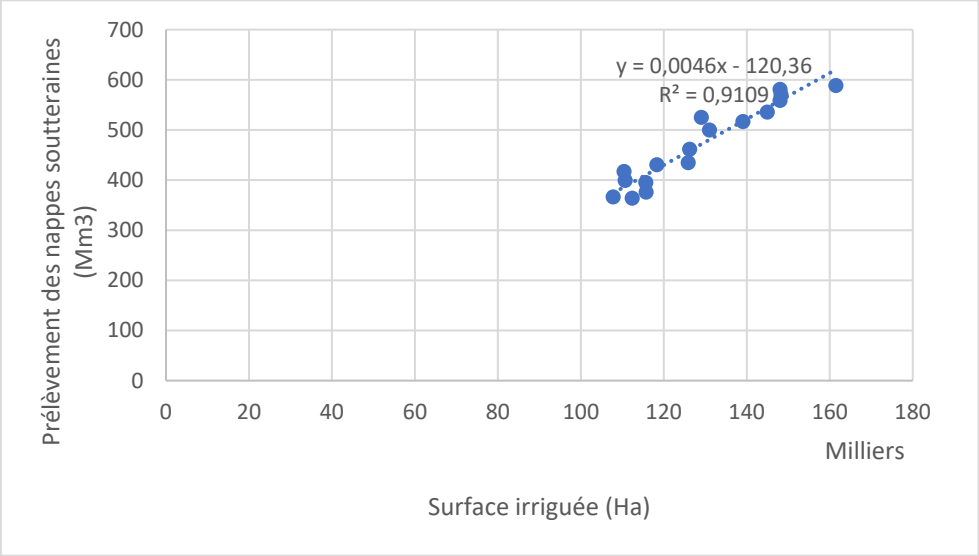


Figure 148 : Tendance d'extension des surfaces irriguées par région

Source : STUDI-EAU 2050

L'extension des surfaces irriguées dans ces régions se traduit par une pression de plus en plus prononcée sur les ressources en eaux souterraines comme le montre le graphique ci-après qui confirme une forte corrélation entre les surfaces des périmètres irrigués et les prélèvements souterrains.



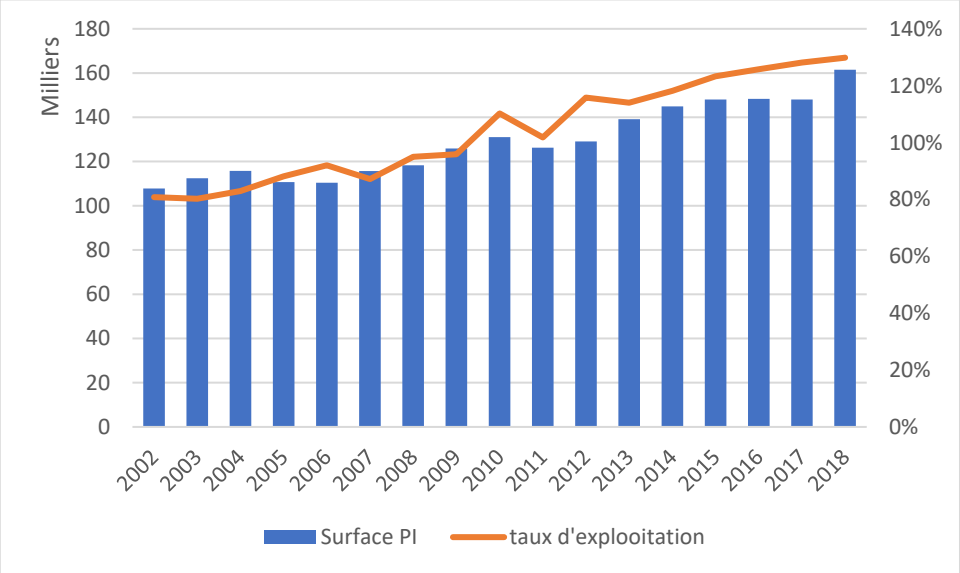


Figure 149 : Corrélation et tendance entre les surfaces irriguées et les prélèvements des nappes souterraines dans le Centre Ouest

Source : MARHPM DGRE traitement STUDI

Ces pressions seront déclinées par scénarios tel que identifiés par la démarche prospective.

En fin de l'étape 3 et en perspective de l'étape 4, la vision proactive se fera par croisement des 2 démarches (modélisation hydro-économique et prospective). L'un alimentant l'autre et vice versa pour le confortement et la validation et/ou recentrage des scénarios compte tenu des limites du système eau et des équilibres offre et demande.

Les simulation futures (étape 4) se feront scénario par scénario afin de confronter sinon réajuster chaque scénario aux limites hydro-économiques de rendement et de rentabilité avec bien entendu la prise en compte des aspects sociaux et environnementaux. Le scénario le plus favorable sera celui qui permettra d'atteindre 2050 avec un système : gérable, résilient, durable, inclusif, avec un paquet technologique réfléchi, raisonné et préparé par la présente étude.

4 CHAPITRE 4 : CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS : VERS UN MODELE RAISONNE D'AIDE A LA DECISION DE LA GESTION DE LA DEMANDE

Turton et Meissner ont conçu un modèle des politiques publiques en transition de la gestion de l'offre vers la gestion de la demande face à l'augmentation de la consommation.

Ce modèle décrit la croissance de la consommation d'eau en fonction du temps, sous l'effet de la croissance de la population, du développement industrielles et l'augmentation des demandes urbains et agricoles. Tant que la demande peut être satisfaite, le système est en en excédent. Quand la consommation atteint un premier seuil « première transition », c'est-à-dire l'eau est devenue rare. Les politiques publiques se dirigent vers une forte mobilisation des ressources (constructions des barrages, transferts inter-régionaux etc.).

Cette politique d'augmentation de l'offre déplace le seuil de saturation vers un seuil de « seconde transition ». C'est le passage de rareté hydrique au déficit hydrique. L'offre n'est plus suffisante pour les besoins malgré les efforts de mobilisation.

Ainsi, une politique de gestion de la demande s'impose, c'est-à-dire mettre en place une politique qui vise à réallouer les ressources en favorisant des usages prioritaires et diminuer la courbe de demande. Dans ce modèle, la qualité et la pollution joue un rôle déterminant. La pollution fait survenir le déficit hydrique plus tôt. C'est élément d'identification et de survenue de la pénurie.

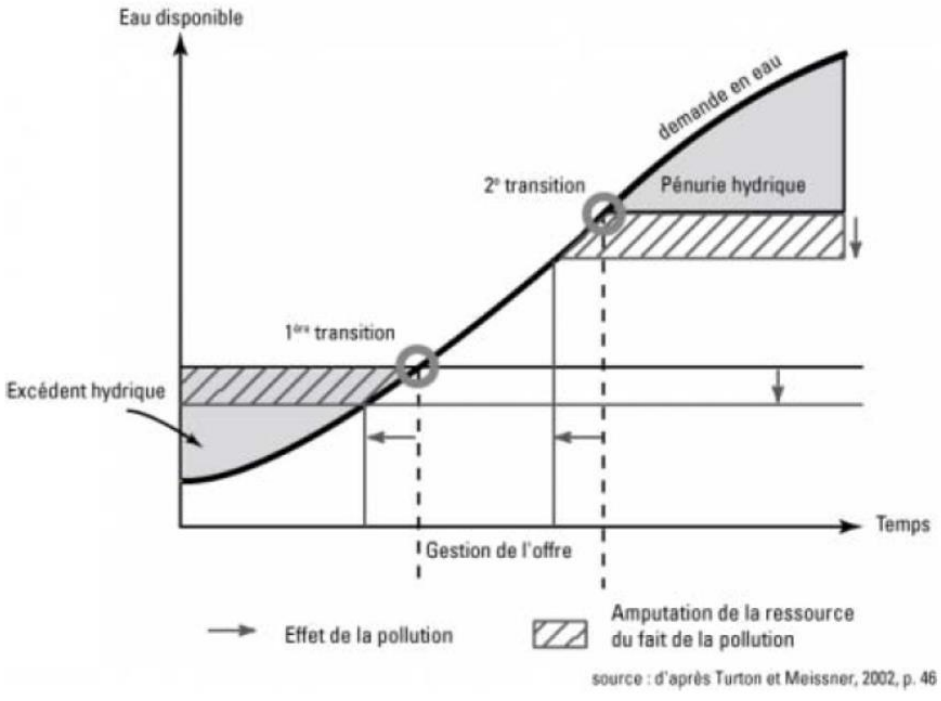


Figure 150 : Pollution et évolution du cycle « hydro-social »[54]

Avec une tendance manifeste vers la hausse de la demande en eau, un logigramme a été conceptualisé par le Consultant aux fins d'aide à la décision pour une gestion optimale et durable des ressources en eaux de surface et souterraines en situation normale et extrême. Dans ce contexte, le schéma ci-après présente

[54] Romarin Garcier (2010) : Du bon usage de la pénurie en eau : Pollution, pénurie et réponses institutionnelles 1949-1971. Géocarrefour. Vol.85/2P169-180. https://doi.org/10.4000/geocarrefour.7876.

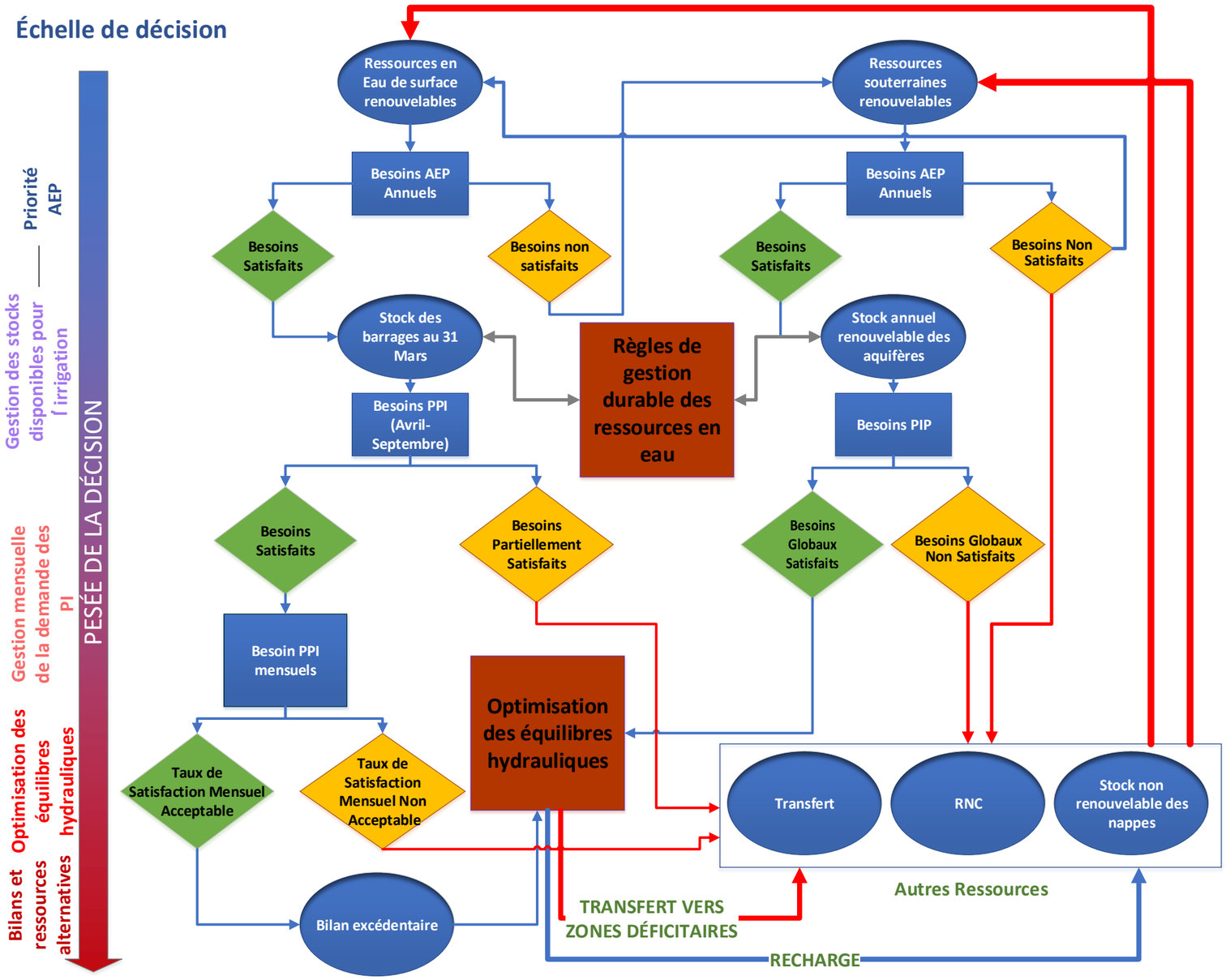
les niveaux de pesée de la décision et/ou d'arbitrage allant des niveaux de maitrise par les départements gestionnaires jusqu'aux situations de crise et d'un niveau d'exigence supérieure de décision.

Le logigramme se base sur une nouvelle politique de gestion de la demande qui serait préétablie et raisonnée. Cette approche proactive en rupture avec l'approche réactive de la gestion de l'offre conduit aux règles suivantes de gestion :

- On fait l'hypothèse qu'au 31 mars de chaque année, les stocks mobilisés dans les réservoirs de surface et souterrains sont connus et arrêtés à cette date. Bien entendu quelques épisodes pluvieux peuvent se produire certaines années au-delà de cette date. Ces épisodes s'ils adviennent seront soient faibles soient dans le sens conservatif du système (apport additionnel d'eau plutôt bénéfique en début de saison sèche) ;
- La gestion de la demande démarre donc en saison de pointe et nous la limitant au 30 Septembre, considérant ces six mois comme la période critique de satisfaction de la demande et que le retour des pluies et de plus en plus probable entre Octobre et Novembre. Ceci est valable pour le moins au nord de la Tunisie (là où se trouve l'essentiel des barrages) ;
- Cette démarche s'applique essentiellement pour les eaux de surface mais préserve indirectement la gestion des eaux souterraines des pressions licites et illicites ;
- Dans cette logique, l'échelle de pesée de la décision est ainsi graduée comme suit :
    - Une priorité absolue est accordée à l'alimentation en eau potable ;
    - Après satisfaction de l'AEP la gestion des stocks disponibles va pour l'irrigation ;
    - La gestion mensuelle de la demande en eau des périmètres irrigués sera optimisée essentiellement pour les six mois de pointe en minimisant les pertes ;
    - L'optimisation des équilibres hydrauliques sera au centre des décisions pour gérer la demande en connaissance de la ressource conventionnelle disponible, le cas échéant en fonction des capacités de transfert s'il y a lieu, des ressources non conventionnelles le cas échéant, et du stock non renouvelable des nappes en ultimes décisions ;
    - Dans le cas où le stock non renouvelable est exploité (année sèche), la règle de gestion impose au décideur le retour rapide vers l'équilibre des aquifères soit par recharge naturelle, sinon et dans la mesure du possible par recharge artificielle ;
    - Le bilan positif des années excédentaires sera consacré à remettre en priorité les équilibres hydrauliques dans l'espace et dans le temps

LOGIGRAMME D'AIDE A LA DECISION DE LA GESTION DE LA DEMANDE EN EAU

ELABORE PAR L'EQUIPE DE MODELISATION DE STUDI DIRIGEE PAR Pr. Yadh ZAHAR



Gestion raisonnée de la demande

L'origine de « l'année hydraulique » pour la gestion de la demande démarre le 31 Mars (les stocks mobilisés dans les réservoirs de surface sont connus et arrêtés à cette date, et les apports au-delà de cette date sont généralement marginaux). La gestion de la demande s'étend jusqu'au 30 Septembre. Durant cette période, et après satisfaction de l'AEP (priorité absolue durant les 12 mois de l'année), la gestion des stocks disponibles va pour l'irrigation : La gestion mensuelle de la demande en eau des périmètres irrigués sera optimisée essentiellement durant les six mois de pointe en minimisant les pertes (avril-septembre).

Gestion raisonnée de la demande

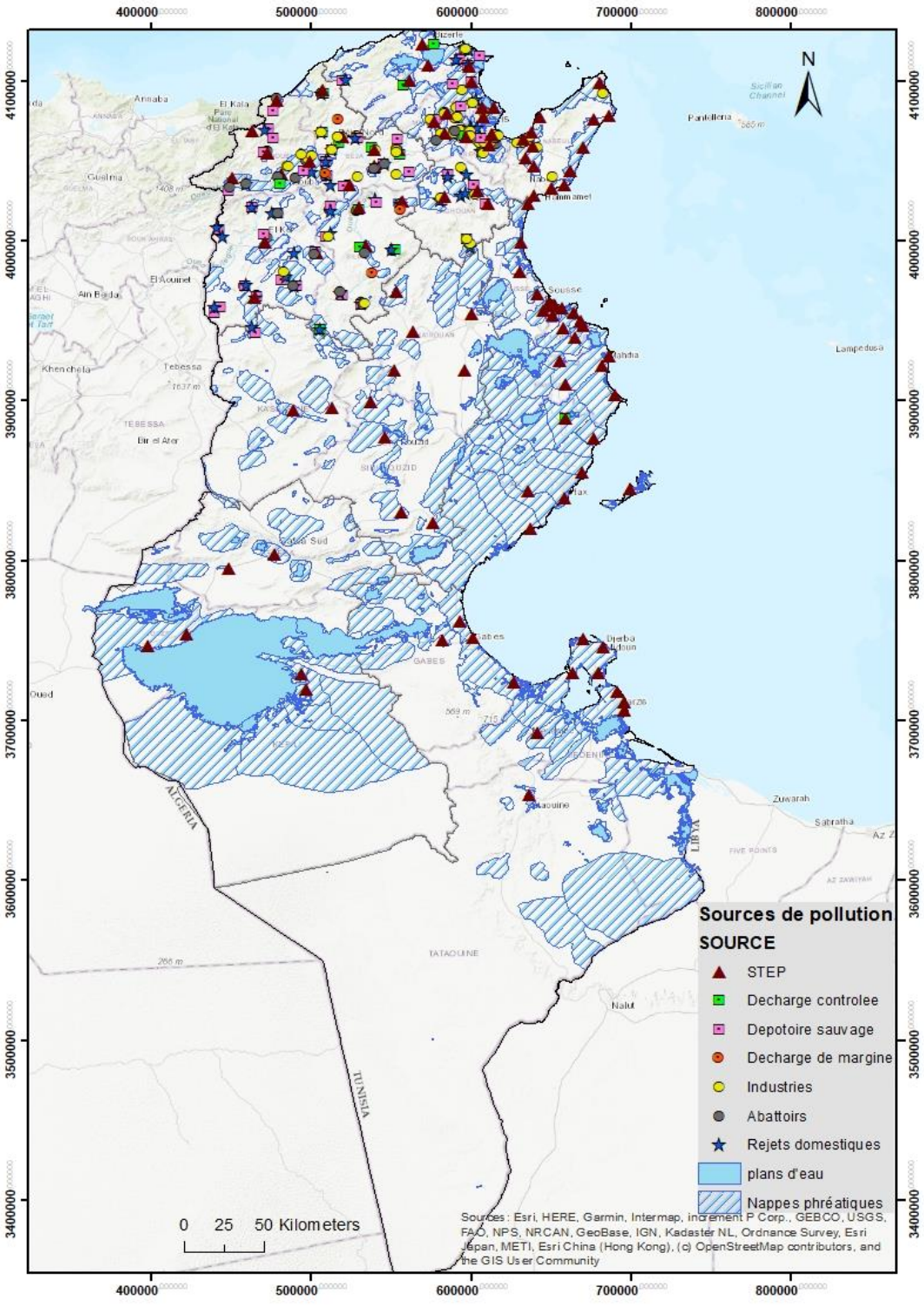
Dans le cas où le stock non renouvelable est exploité partiellement (année sèche), la règle de gestion impose au décideur le retour rapide vers l'équilibre des aquifères soit par recharge naturelle, sinon, et dans la mesure du possible, par recharge artificielle. Le solde positif des années excédentaires sera consacré à recouvrir en priorité les équilibres hydrauliques dans l'espace et dans le temps.

L'optimisation des équilibres hydrauliques sera au centre des décisions pour gérer la demande eau ; en connaissance (1) de la ressource conventionnelle disponible, (2) en fonction des capacités de transfert s'il y a lieu, (3) des ressources non conventionnelles le cas échéant, sinon (4) du stock non renouvelable des nappes en ultimes décisions.

+

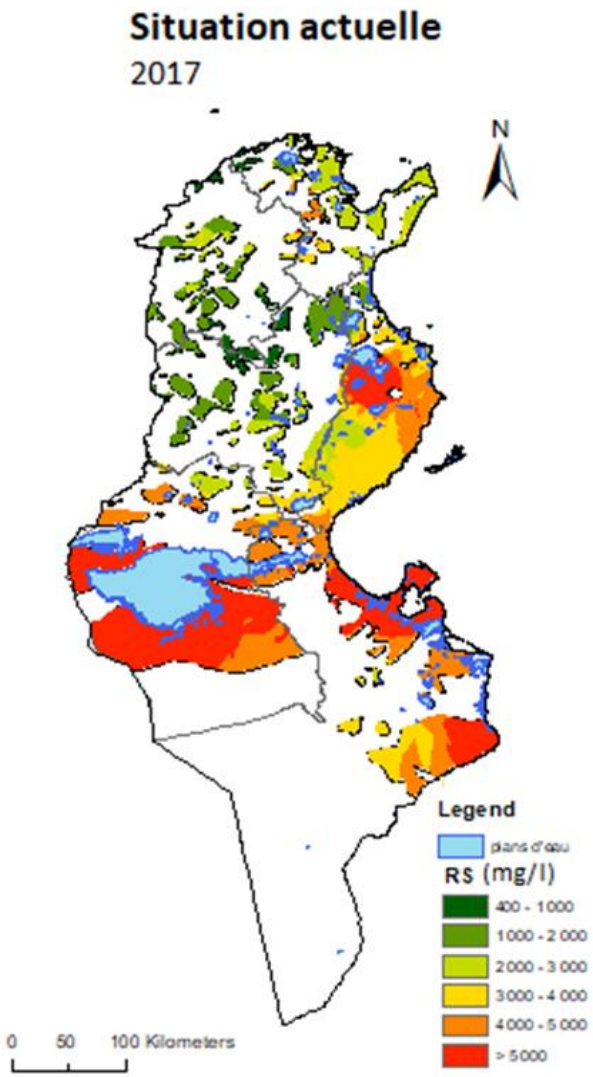
ANNEXES : SOMMAIRE

Annexe 1 : Sources de pollution 1
Annexe 2 : Nappes Phréatiques RS 2
Annexe 3 : Nappes Profondes RS 2
Annexe 4 : Nappes Phréatiques NO3 3
Annexe 5 : Nappes Profondes NO3 3
Annexe 6 : Nappes phréatiques RS : Carte de vulnérabilité 4
Annexe 7 : Nappes profondes RS : Carte de vulnérabilité 4
Annexe 8 : Nappes phréatiques NO3 : Carte de vulnérabilité 5
Annexe 9 : Nappes profondes NO3 : Carte de vulnérabilité 5
Annexe 10 : Tendanciel : Evolution de la salinité des nappes phréatiques 6
Annexe 11 : Tendanciel : Evolution de la salinité des nappes profondes 6
Annexe 12 : Tendanciel : Evolution des nitrates des nappes phréatiques 7
Annexe 13 : Tendanciel : Evolution des nitrates des nappes profondes 7
Annexe 14 : Demande annuelle (2002-2015) de l'eau potable urbain, rural, industriel et touristiques calculées par WEAP 8
Annexe 15 : Projections de la population par gouvernorat 2020-2050 : 9
Annexe 16 : Projections de la population par gouvernorat 2020-2050 : 10
Annexe 17 : Projections de la population par gouvernorat 2020-2050 : 11
Annexe 18 : Projections de la population par gouvernorat 2020-2050 : 12
Annexe 19 : Répartition des volumes des EUT potentiels pour réutilisation en 2050 par usage selon les différents scénarios 13
Annexe 20 : Répartition des volumes des EUT potentiels pour réutilisation en agriculture (Mm3/an) 14
Annexe 21 : Répartition des volumes des EUT potentiels pour l'irrigation des terrains de golf (Mm3/an) 15
Annexe 22 : Répartition des volumes des EUT potentiels pour l'arrosage des espaces verts et jardins d'hôtels (Mm3/an) 16
Annexe 23 : Répartition des volumes des EUT potentiels de réutilisation en Industrie (Mm3/an) 17
Annexe 24 : Répartition des volumes des EUT potentiels de réutilisation pour la recharge de la nappe (Mm3/an) 18
Annexe 25 : Répartition des volumes des EUT potentiels de réutilisation en eau écologique (Mm3/an) 19
Annexe 26 : Les volumes observés de consommation d'eau d'irrigation 20

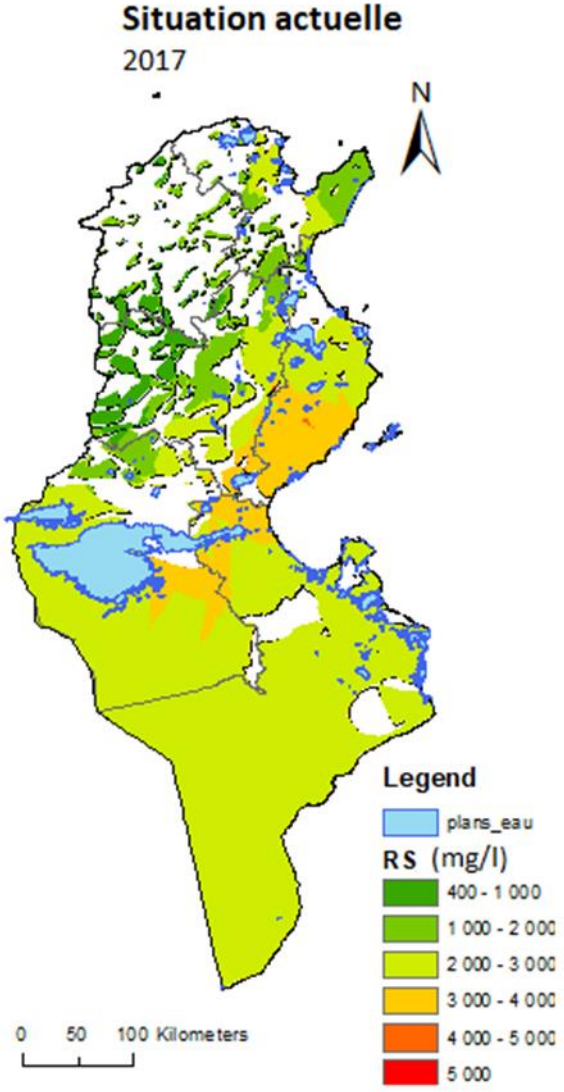


Annexe 1 : Sources de pollution

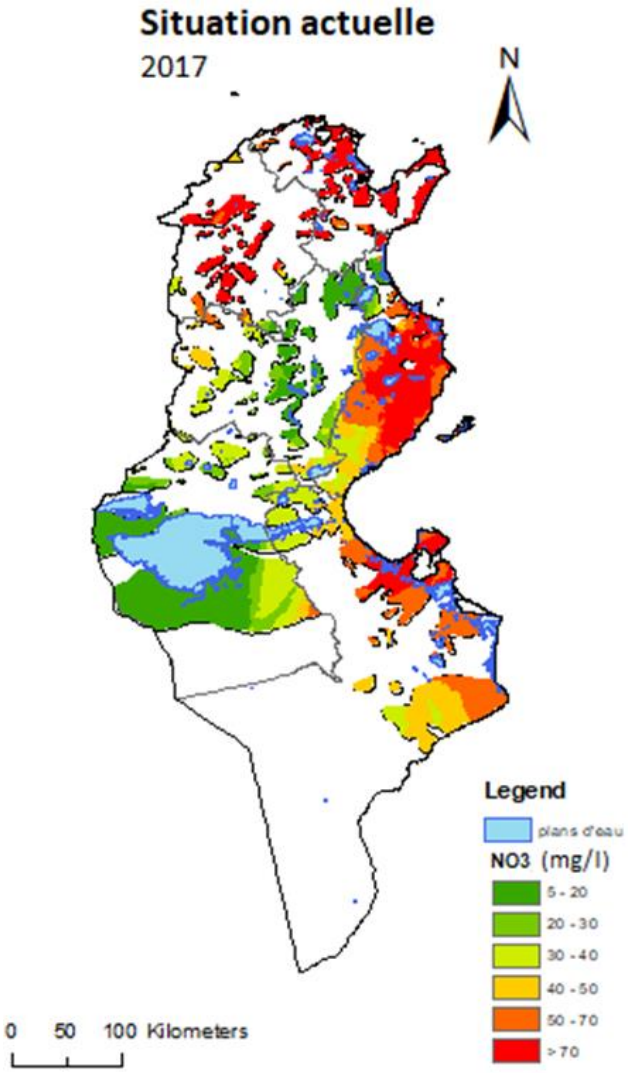
Annexe 2 : Nappes Phréatiques RS



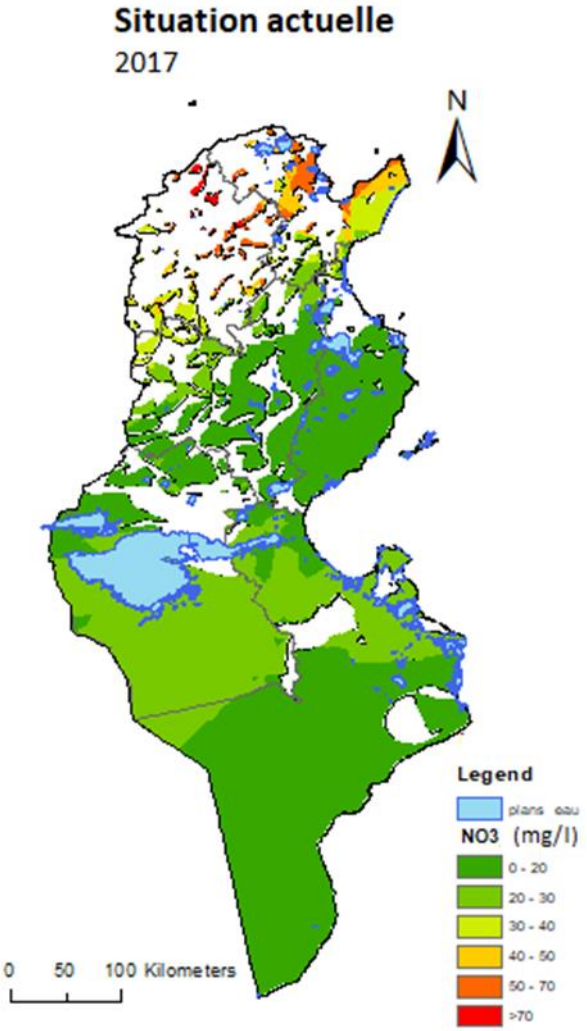
Annexe 3 : Nappes Profondes RS



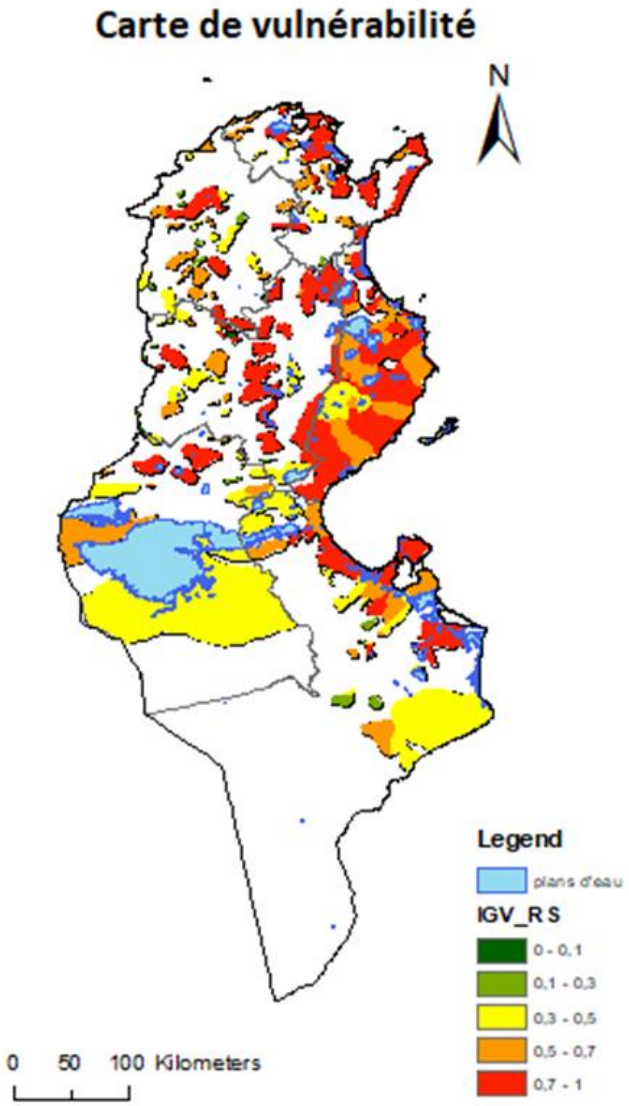
Annexe 4 : Nappes Phréatiques NO3



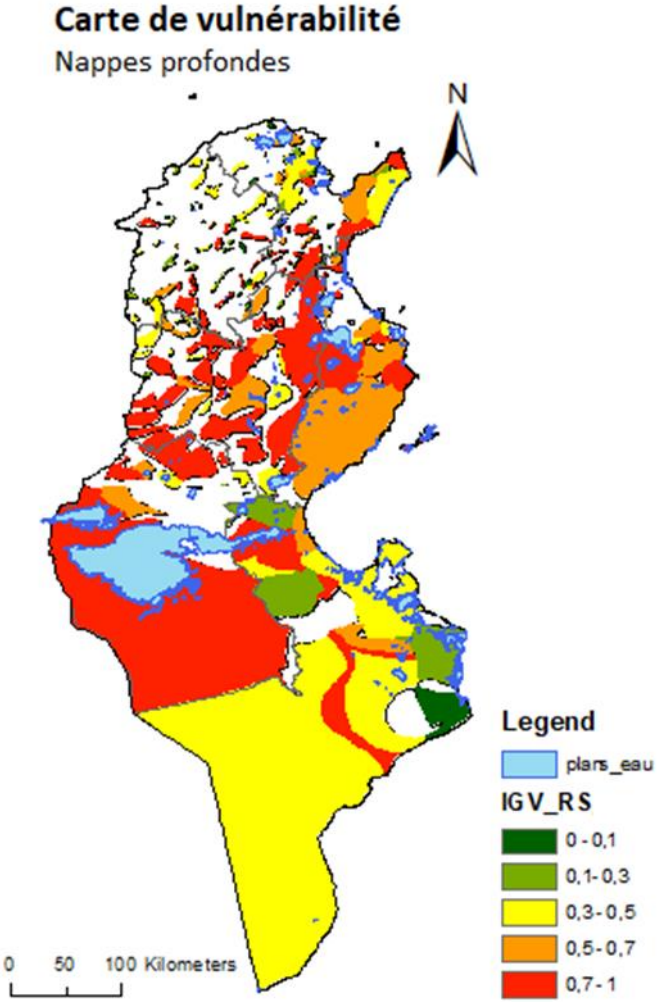
Annexe 5 : Nappes Profondes NO3



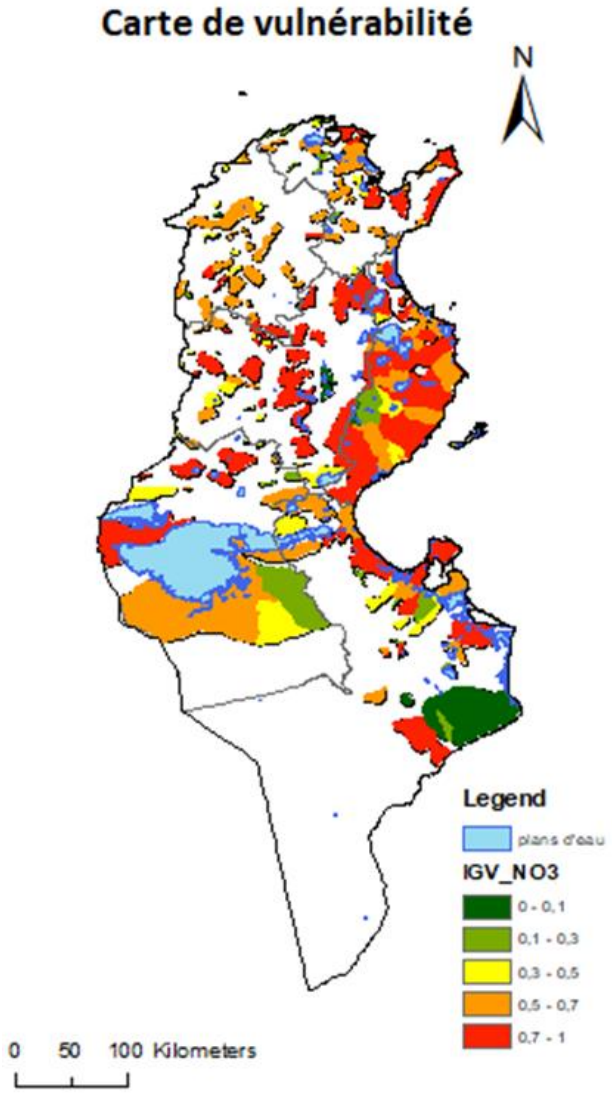
Annexe 6 : Nappes phréatiques RS : Carte de vulnérabilité



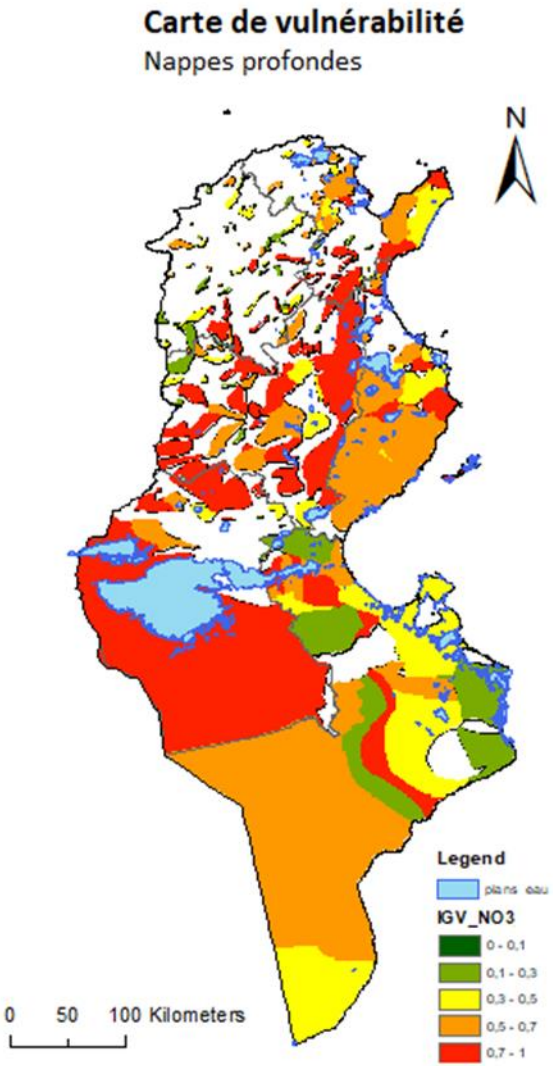
Annexe 7 : Nappes profondes RS : Carte de vulnérabilité



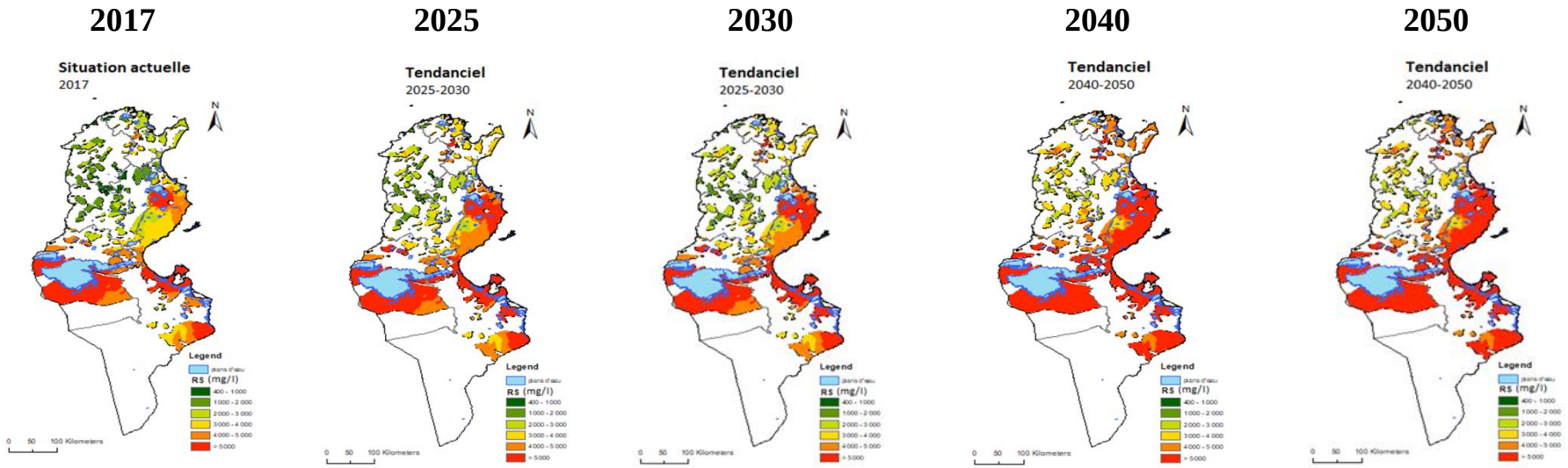
Annexe 8 : Nappes phréatiques NO3 : Carte de vulnérabilité



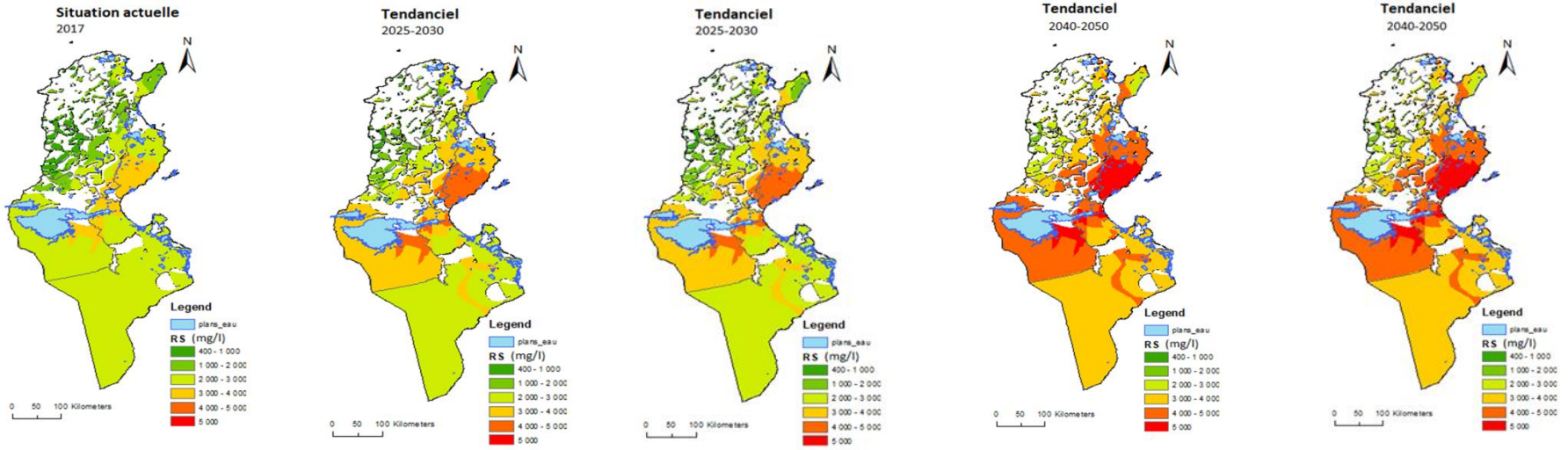
Annexe 9 : Nappes profondes NO3 : Carte de vulnérabilité



Annexe 10 : Tendanciel : Evolution de la salinité des nappes phréatiques

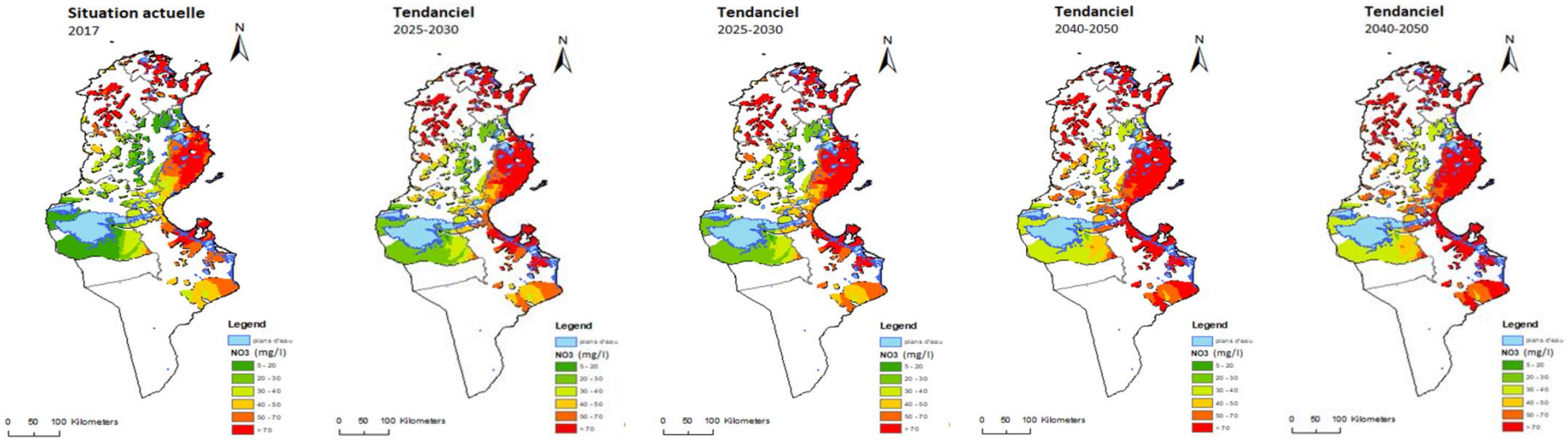


Annexe 11 : Tendanciel : Evolution de la salinité des nappes profondes

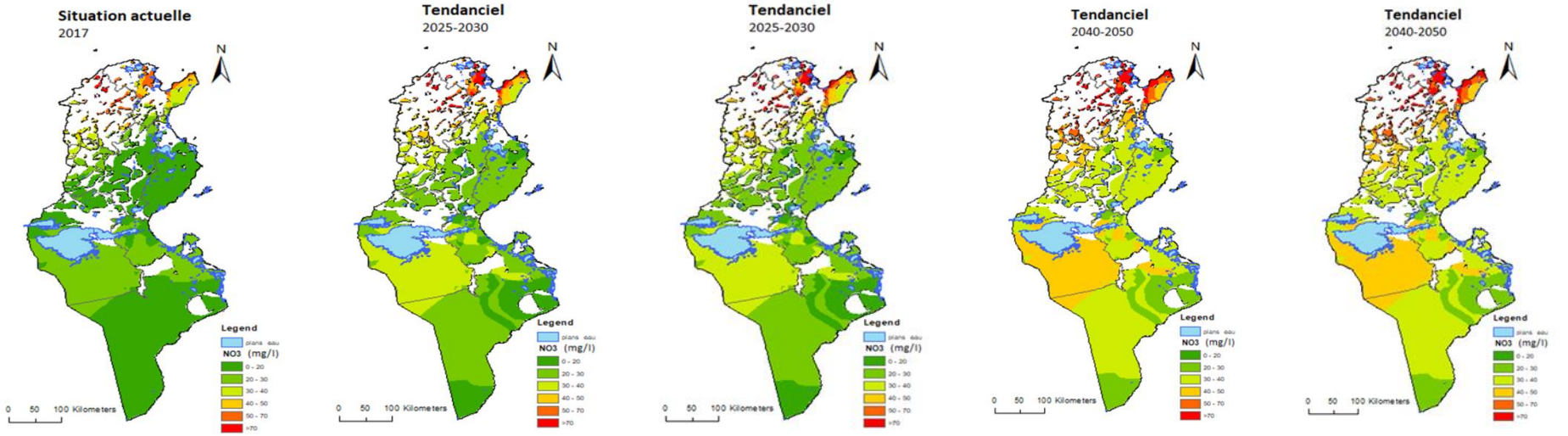


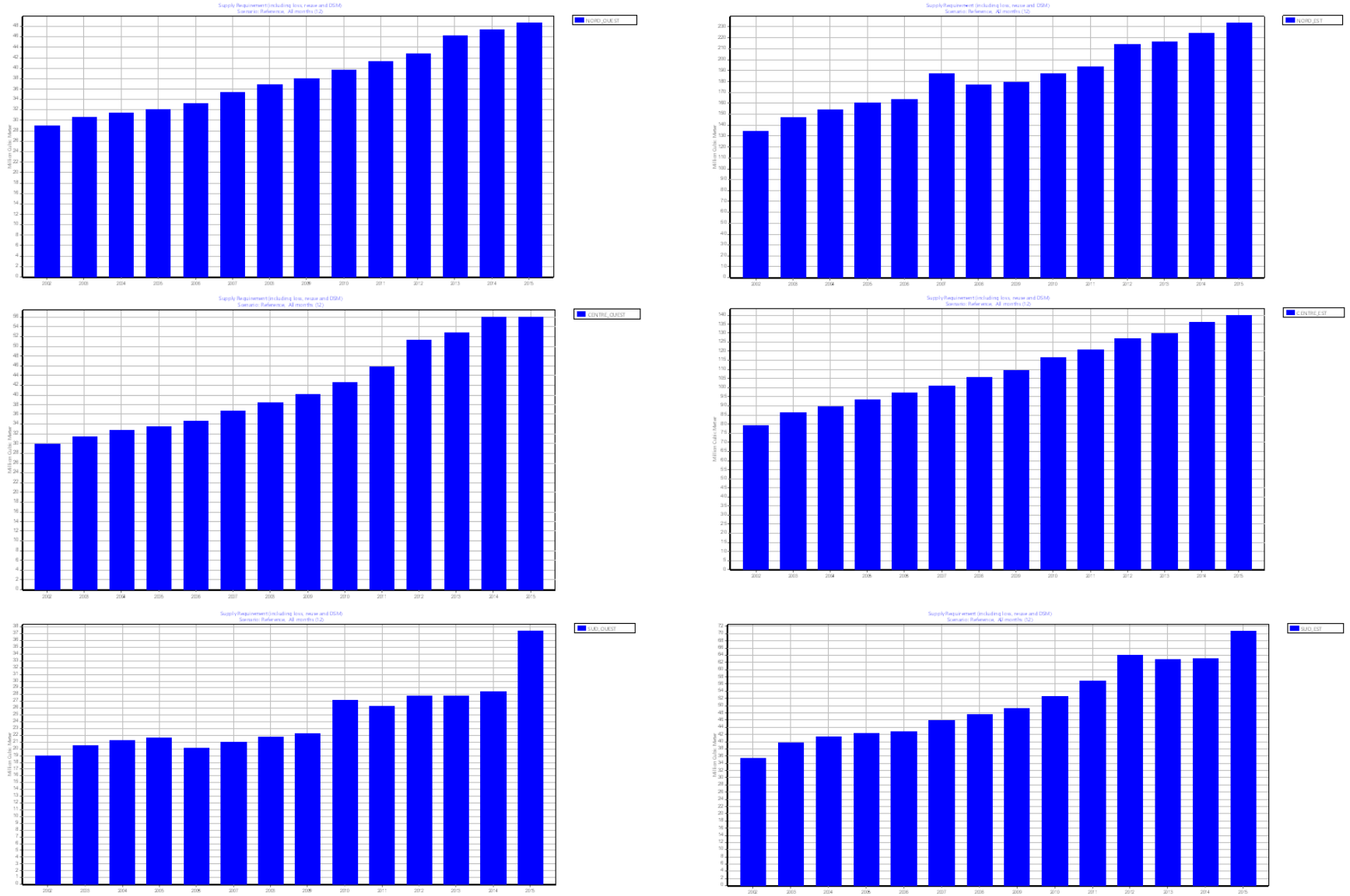
Annexe 12 : Tendanciel : Evolution des nitrates des nappes phréatiques

2017 **2025** **2030** **2040** **2050**



Annexe 13 : Tendanciel : Evolution des nitrates des nappes profondes





Annexe 14 : Demande annuelle (2002-2015) de l'eau potable urbain, rural, industriel et touristiques calculées par WEAP

Annexe 15 : Projections de la population par gouvernorat 2020-2050 : Hypothèse Basse

Gouvernorats	2020	2025	2030	2040	2050	2050/2020
Tunis	1 084 313	1 106 629	1 111 389	1 085 438	1 046 931	96,6%
Ariana	667 497	756 080	842 758	1 013 874	1 204 589	180,5%
Ben Arous	715 411	784 857	847 309	956 215	1 065 720	149,0%
Manouba	423 499	449 556	469 606	496 184	517 756	122,3%
Nabeul	867 271	918 715	957 686	1 007 673	1 047 104	120,7%
Zaghouan	190 600	199 564	205 616	211 359	214 564	112,6%
Bizerte	600 359	617 503	625 004	619 987	607 374	101,2%
Béja	310 450	307 547	299 812	275 890	250 724	80,8%
Jendouba	408 097	400 892	387 532	350 655	313 347	76,8%
Le Kef	249 204	245 070	237 159	215 057	192 593	77,3%
Siliana	229 991	226 746	219 982	200 490	180 456	78,5%
Sousse	748 732	814 603	872 132	967 979	1 061 019	141,7%
Monastir	607 086	654 206	693 740	755 390	812 305	133,8%
Mahdia	446 179	466 436	479 836	491 705	497 611	111,5%
Sfax	1 026 882	1 074 157	1 105 686	1 134 414	1 149 435	111,9%
Kairouan	600 316	611 748	613 453	597 325	574 399	95,7%
Kasserine	463 910	474 515	477 621	468 557	453 957	97,9%
Sidi Bouzid	458 359	474 214	482 792	484 554	480 284	104,8%
Gabès	405 708	422 022	431 990	438 291	439 162	108,2%
Medenine	520 456	543 329	558 160	570 377	575 624	110,6%
Tataouine	152 669	154 088	153 039	146 177	137 890	90,3%
Gafsa	355 824	361 149	360 706	348 418	332 369	93,4%
Tozeur	116 053	120 197	122 502	123 213	122 389	105,5%
Kebili	170 548	180 244	187 453	196 321	203 055	119,1%
Total	**11 819 416**	**12 364 065**	**12 742 966**	**13 155 545**	**13 480 657**	**114,3%**

Source : INS traitement STUDI

Annexe 16 : Projections de la population par gouvernorat 2020-2050 : Hypothèse Haute

Gouvernorats	2020	2025	2030	2040	2050	2050/2020
Tunis	1 086 720	1 114 923	1 129 711	1 132 146	1 123 913	103,4%
Ariana	668 979	761 747	856 651	1 057 502	1 293 165	193,3%
Ben Arous	716 999	790 739	861 277	997 362	1 144 084	159,6%
Manouba	424 439	452 926	477 347	517 535	555 827	131,0%
Nabeul	869 196	925 601	973 475	1 051 035	1 124 099	129,3%
Zaghouan	191 023	201 059	209 006	220 454	230 342	120,6%
Bizerte	601 692	622 131	635 308	646 666	652 035	108,4%
Béja	311 139	309 853	304 755	287 762	269 160	86,5%
Jendouba	409 003	403 897	393 921	365 744	336 388	82,2%
Le Kef	249 757	246 906	241 069	224 311	206 754	82,8%
Siliana	230 501	228 446	223 609	209 117	193 725	84,0%
Sousse	750 394	820 709	886 510	1 009 633	1 139 038	151,8%
Monastir	608 433	659 110	705 177	787 895	872 036	143,3%
Mahdia	447 169	469 933	487 747	512 864	534 202	119,5%
Sfax	1 029 161	1 082 208	1 123 915	1 183 229	1 233 956	119,9%
Kairouan	601 648	616 333	623 567	623 029	616 636	102,5%
Kasserine	464 939	478 072	485 495	488 719	487 337	104,8%
Sidi Bouzid	459 377	477 769	490 751	505 405	515 600	112,2%
Gabès	406 608	425 185	439 112	457 151	471 455	115,9%
Medenine	521 611	547 401	567 362	594 921	617 950	118,5%
Tataouine	153 008	155 243	155 562	152 468	148 029	96,7%
Gafsa	356 614	363 856	366 653	363 411	356 809	100,1%
Tozeur	116 311	121 097	124 522	128 515	131 389	113,0%
Kebili	170 927	181 595	190 544	204 769	217 986	127,5%
Total	**11 845 646**	**12 456 739**	**12 953 045**	**13 721 644**	**14 471 916**	**122,8%**

Source : INS traitement STUDI-EAU 2050

Annexe 17 : Projections de la population par gouvernorat 2020-2050 : Hypothèse Haute-bis

Gouvernorats	2014	2020	2025	2030	2040	2050	2050/2020
Tunis	1 045 696	1 088 898	1 120 536	1 138 713	1 144 521	1 138 023	104,5%
Ariana	572 381	670 320	765 582	863 478	1 069 062	1 309 399	195,3%
Ben Arous	638 425	718 437	794 720	868 141	1 008 264	1 158 447	161,2%
Manouba	385 256	425 290	455 206	481 151	523 192	562 805	132,3%
Nabeul	792 527	870 938	930 261	981 232	1 062 523	1 138 211	130,7%
Zaghouan	176 117	191 406	202 072	210 672	222 864	233 233	121,9%
Bizerte	572 381	602 898	625 263	640 371	653 735	660 221	109,5%
Béja	308 205	311 762	311 412	307 184	290 908	272 539	87,4%
Jendouba	407 271	409 823	405 930	397 060	369 742	340 611	83,1%
Le Kef	242 161	250 258	248 150	242 990	226 763	209 350	83,7%
Siliana	220 147	230 963	229 596	225 391	211 403	196 157	84,9%
Sousse	671 447	751 898	824 841	893 575	1 020 669	1 153 338	153,4%
Monastir	550 366	609 653	662 428	710 796	796 508	882 983	144,8%
Mahdia	407 271	448 066	472 298	491 633	518 470	540 908	120,7%
Sfax	957 637	1 031 224	1 087 656	1 132 871	1 196 163	1 249 447	121,2%
Kairouan	572 381	602 854	619 436	628 536	629 839	624 378	103,6%
Kasserine	440 293	465 871	480 479	489 364	494 061	493 455	105,9%
Sidi Bouzid	429 286	460 298	480 174	494 662	510 929	522 073	113,4%
Gabès	374 249	407 423	427 326	442 611	462 148	477 373	117,2%
Medenine	484 322	522 657	550 157	571 883	601 424	625 708	119,7%
Tataouine	154 103	153 315	156 024	156 802	154 134	149 887	97,8%
Gafsa	341 227	357 329	365 687	369 575	367 383	361 288	101,1%
Tozeur	110 073	116 544	121 707	125 514	129 920	133 038	114,2%
Kebili	154 103	171 269	182 510	192 062	207 007	220 723	128,9%
Total	**11 007 326**	**11 869 394**	**12 519 452**	**13 056 267**	**13 871 633**	**14 653 599**	**124,1%**

Source : INS traitement STUDI-EAU 2050

Annexe 18 : Projections de la population par gouvernorat 2020-2050 : Hypothèse Constante

Gouvernorats	2014	2020	2025	2030	2040	2050	2050/2020
Tunis	1 045 696	1 087 736	1 118 831	1 138 487	1 154 902	1 162 229	106,8%
Ariana	572 381	669 605	764 417	863 306	1 078 758	1 337 251	199,7%
Ben Arous	638 425	717 670	793 511	867 968	1 017 409	1 183 088	164,9%
Manouba	385 256	424 836	454 514	481 056	527 937	574 776	135,3%
Nabeul	792 527	870 009	928 845	981 037	1 072 160	1 162 421	133,6%
Zaghouan	176 117	191 201	201 764	210 630	224 885	238 194	124,6%
Bizerte	572 381	602 255	624 311	640 244	659 664	674 264	112,0%
Béja	308 205	311 430	310 939	307 123	293 546	278 336	89,4%
Jendouba	407 271	409 385	405 312	396 981	373 095	347 856	85,0%
Le Kef	242 161	249 991	247 772	242 942	228 819	213 803	85,5%
Siliana	220 147	230 717	229 247	225 346	213 320	200 329	86,8%
Sousse	671 447	751 096	823 585	893 397	1 029 926	1 177 869	156,8%
Monastir	550 366	609 002	661 420	710 655	803 732	901 765	148,1%
Mahdia	407 271	447 588	471 580	491 536	523 172	552 413	123,4%
Sfax	957 637	1 030 124	1 086 001	1 132 646	1 207 012	1 276 023	123,9%
Kairouan	572 381	602 211	618 493	628 411	635 552	637 658	105,9%
Kasserine	440 293	465 374	479 747	489 267	498 542	503 951	108,3%
Sidi Bouzid	429 286	459 806	479 443	494 564	515 563	533 177	116,0%
Gabès	374 249	406 989	426 675	442 523	466 340	487 527	119,8%
Medenine	484 322	522 099	549 320	571 770	606 879	639 017	122,4%
Tataouine	154 103	153 151	155 787	156 770	155 532	153 075	100,0%
Gafsa	341 227	356 947	365 131	369 501	370 715	368 973	103,4%
Tozeur	110 073	116 420	121 522	125 489	131 098	135 868	116,7%
Kebili	154 103	171 087	182 232	192 024	208 885	225 418	131,8%
Total	**11 007 326**	**11 856 729**	**12 500 399**	**13 053 672**	**13 997 445**	**14 965 284**	**127,1%**

Source : INS traitement STUDI-EAU 2050

Annexe 19 : Répartition des volumes des EUT potentiels pour réutilisation en 2050 par usage selon les différents scénarios

Usage	Actuel (2017)		REUT réutilisées à l'horizon de 2050	
	Volume (Mm^3)	Taux de réutilisation (% EUT)	Volume (Mm^3)	Taux de réutilisation (% EUT)
Irrigation agricole	16,6	6%	56,5	12%
Terrains de golf	7,6	3%	14,0	3%
Espaces verts et tourisme	0,89	0,3%	5,3	1.1%
Usage industriel	-	-	5,0	1,1%
Recharge des nappes	2,13	0,8%	33.7	7.3%
Eaux écologiques	0.9	0.3%	24.9	5.4%
Total REUSE	59,5	22%	139.4	30%

Source : STUDI Eau 2050

Annexe 20 : Répartition des volumes des EUT potentiels pour réutilisation en agriculture (Mm3/an)

Gouvernorat	2018	2020	2030	2040	2050
Tunis	1,40	1,54	2,27	2,99	3,72
Ariana	3,95	4,36	6,41	8,46	10,51
Ben Arous	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Manouba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nabeul	2,13	2,65	5,23	7,81	10,39
Zaghouan	0,30	0,33	0,49	0,65	0,81
Bizerte	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Beja	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Jendouba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kef	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Siliana	0,06	0,06	0,09	0,12	0,15
Kairouan	1,13	1,25	1,84	2,43	3,02
Kasserine	0,35	0,38	0,57	0,75	0,93
Sidi Bouzid	0,00	0,11	0,68	1,24	1,80
Sousse	1,74	2,08	3,75	5,43	7,11
Monastir	0,45	0,50	0,73	0,97	1,20
Mahdia	0,00	0,03	0,17	0,31	0,45
Sfax	2,09	2,34	3,57	4,79	6,02
Gafsa	1,78	2,12	3,80	5,48	7,16
Tozeur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kebili	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gabès	1,07	1,18	1,73	2,28	2,83
Medenine	0,13	0,15	0,22	0,29	0,36
Tataouine	0,03	0,03	0,05	0,07	0,08
Total général	**16,62**	**19,12**	**31,59**	**44,07**	**56,54**

Source : STUDI Eau 2050

Annexe 21 : Répartition des volumes des EUT potentiels pour l'irrigation des terrains de golf (Mm3/an)

Gouvernorat	2018	2020	2030	2040	2050
Tunis	1,56	1,64	2,04	2,44	2,85
Ariana	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ben Arous	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Manouba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nabeul	0,42	0,45	0,55	0,66	0,77
Zaghouan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bizerte	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Beja	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Jendouba	1,10	1,16	1,45	1,73	2,01
Kef	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Siliana	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kairouan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kasserine	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sidi Bouzid	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sousse	2,21	2,32	2,89	3,46	4,03
Monastir	1,49	1,57	1,95	2,34	2,72
Mahdia	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sfax	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gafsa	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Tozeur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kebili	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gabès	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Medenine	0,85	0,89	1,11	1,33	1,54
Tataouine	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total général	**7,64**	**8,03**	**10,00**	**11,96**	**13,93**

Source : STUDI Eau 2050

Annexe 22 : Répartition des volumes des EUT potentiels pour l'arrosage des espaces verts et jardins d'hôtels (Mm3/an)

Gouvernorat	2018	2020	2030	2040	2050
Tunis	0,05	0,39	0,51	0,60	0,69
Ariana	0,21	0,21	0,26	0,32	0,38
Ben Arous	0,18	0,23	0,27	0,31	0,34
Manouba	0,00	0,11	0,13	0,14	0,15
Nabeul	0,00	0,22	0,30	0,36	0,42
Zaghouan	0,01	0,03	0,04	0,04	0,05
Bizerte	0,04	0,14	0,15	0,16	0,16
Beja	0,01	0,05	0,06	0,06	0,05
Jendouba	0,01	0,05	0,06	0,07	0,07
Kef	0,06	0,07	0,08	0,10	0,12
Siliana	0,02	0,04	0,04	0,04	0,04
Kairouan	0,08	0,08	0,10	0,11	0,12
Kasserine	0,03	0,08	0,09	0,10	0,10
Sidi Bouzid	0,00	0,05	0,07	0,08	0,09
Sousse	0,00	0,24	0,41	0,58	0,73
Monastir	0,01	0,22	0,32	0,41	0,49
Mahdia	0,01	0,08	0,13	0,18	0,22
Sfax	0,01	0,23	0,28	0,32	0,34
Gafsa	0,01	0,09	0,10	0,10	0,09
Tozeur	0,04	0,04	0,05	0,06	0,08
Kebili	0,05	0,03	0,04	0,05	0,05
Gabès	0,02	0,10	0,13	0,16	0,17
Medenine	0,00	0,16	0,23	0,30	0,37
Tataouine	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04
Total général	0,89	2,99	3,91	4,69	5,33

Source : STUDI Eau 2050

Annexe 23 : Répartition des volumes des EUT potentiels de réutilisation en Industrie (Mm3/an)

Gouvernorat	2018	2020	2030	2040	2050
Tunis	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ariana	0,00	0,00	0,02	0,03	0,04
Ben Arous	0,00	0,04	0,25	0,45	0,66
Manouba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nabeul	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Zaghouan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bizerte	0,00	0,03	0,16	0,29	0,42
Beja	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Jendouba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kef	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Siliana	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kairouan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kasserine	0,00	0,06	0,35	0,63	0,92
Sidi Bouzid	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sousse	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Monastir	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mahdia	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sfax	0,00	0,00	0,02	0,04	0,05
Gafsa	0,00	0,11	0,64	1,18	1,71
Tozeur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kebili	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gabès	0,00	0,07	0,45	0,82	1,20
Medenine	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Tataouine	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total général	**0,00**	**0,31**	**1,88**	**3,44**	**5,00**

Source : STUDI Eau 2050

Annexe 24 : Répartition des volumes des EUT potentiels de réutilisation pour la recharge de la nappe (Mm3/an)

Gouvernorat	2018	2020	2030	2040	2050
Tunis	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ariana	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ben Arous	0,00	0,63	3,75	6,88	10,00
Manouba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nabeul	0,29	1,30	6,38	11,46	16,54
Zaghouan	0,00	0,08	0,46	0,84	1,22
Bizerte	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Beja	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Jendouba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kef	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Siliana	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kairouan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kasserine	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sidi Bouzid	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sousse	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Monastir	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mahdia	0,69	0,73	0,92	1,11	1,30
Sfax	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gafsa	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Tozeur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kebili	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gabès	0,00	0,15	0,93	1,70	2,47
Medenine	1,15	1,21	1,53	1,84	2,16
Tataouine	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total général	**2,13**	**4,10**	**13,97**	**23,83**	**33,69**

Source : STUDI Eau 2050

Annexe 25 : Répartition des volumes des EUT potentiels de réutilisation en eau écologique (Mm3/an)

Gouvernorat	2018	2020	2030	2040	2050
Tunis	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ariana	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ben Arous	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Manouba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nabeul	0,90	1,01	1,57	2,12	2,68
Zaghouan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bizerte	0,00	1,39	8,32	15,26	22,19
Beja	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Jendouba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kef	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Siliana	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kairouan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kasserine	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sidi Bouzid	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sousse	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Monastir	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mahdia	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sfax	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gafsa	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Tozeur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kebili	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gabès	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Medenine	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Tataouine	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total général	**0,90**	**2,40**	**9,89**	**17,38**	**24,87**

Source : STUDI Eau 2050

Annexe 26 : Les volumes observés de consommation d'eau d'irrigation

Cultures	Valeurs Observées (m3/ha/an)		
	Région SUD	Région Centre	Région Nord
Agrumes	7 500	7 500	6 500
AM_PIST	3 500	3 500	2 500
Artichaut	8 000	7 500	7 600
Ble_dur_ble_tendre	3 000	3 000	2 000
FEV_PP	2 000	2 000	1 100
Fourrage_saison_ete	4 500	5 000	6 000
Fourrages_perennes_hiver	1 500	1 500	3 000
Grenadier	6 500	4 000	4 000
oignon_ail	4 500	4 500	5 000
Oliveraie	2 000	2 000	1 500
Orge_triticale	2 000	2 000	1 000
Palmier_dattier	13 500	-	-
Pasteque_melon	6 000	5 500	5 000
PECH_ABR	5 000	6 000	5 000
Piment	5 500	6 500	5 400
Pomme_de_terre	5 000	5 000	4 000
Pommier	7 000	6 500	3 500
Tomate	6 000	6 000	5 000
Vigne	5 000	6 000	4 000

Source : STUDI Eau 2050