



**Etude scientifique et son application portant sur  
les possibilités résilientes d'accès à et d'utilisation d'eau d'irrigation  
dans l'agriculture / horticulture**

**1<sup>er</sup> Rapport Annuel**  
Octobre 2023



**Equipe de projet :**

Cédric Magain & Alexia Guebels

Serge Brouyère

Caroline De Clerck

Aurore Degré

Jeroen Meersmans

Philippe Orban

Joost Wellens (coordinateur)

**E-mails :**

Cedric.Magain@uliege.be

P.Orban@uliege.be

Joost.Wellens@uliege.be

**Avec le financement de :**

*Fond pour la gestion de l'eau*

**Avec le soutien de :**

*Administration de la Gestion de l'Eau :*

Division de l'Hydrologie : Service Hydrologie

Service Ecologie & Pêche

Division Eaux Souterraines & Eaux potables

Division de la Protection des Eaux

*Administration des Services Techniques de l'Agriculture :*

Service de l'horticulture

Service de pédologie

Service météorologique

Service SIG

*Ministère de la Mobilité et des Travaux Public :*

Service de la navigation fluviale

*Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt (Mosel-Saar-Lahn ; Allemagne)*

*Producteurs horticoles luxembourgeois*

***« Les méthodologies et résultats présentés au sein de ce document sont à considérer comme intermédiaires. Le présent document a comme vocation de présenter ce qui a été réalisé lors de la première année du projet IrriLux »***

## Table des matières

Chapitre 1 : Mise en contexte.....	1
1. Introduction.....	1
1.1. Contexte général.....	1
1.2. Agriculture irriguée luxembourgeoise.....	1
1.3. Pression sur les ressources en eau .....	2
2. IrriLux.....	3
2.1. Objectif .....	3
2.2. Échelles de travail .....	3
3. Chronogramme.....	4
Chapitre 2 : Données .....	5
1. Objectif .....	5
2. Données climatiques : sélection des stations.....	5
2.1. Jeux de données disponibles.....	5
2.2. Analyse statistique à l'aide de l'outil de gestion de données mis en place .....	12
2.3. Focus sur les besoins horticoles .....	15
2.4. Résumé .....	18
3. Données climatiques : précipitations .....	19
3.1. Pondération inverse à la distance (Inverse Distance Weighting).....	19
3.2. Résultats .....	21
4. Eaux de surface.....	22
4.1. Débit .....	22
4.2. Hauteur limnimétrique.....	27
4.3. Courbe de tarage .....	27
5. Eaux souterraines .....	27
5.1. Sources et forages .....	27
5.2. Hauteur piézométrique .....	29
6. Eau potable.....	30
6.1. Prélèvements.....	30
6.2. Données.....	31
7. Eaux en économie circulaire.....	32
8. Caractérisation qualitative des eaux de surface et souterraines .....	32
Chapitre 3 : Terrain .....	35
1. Visite d'exploitations .....	35
1.1. Contexte et objectif .....	35

1.2.	Présentation des exploitations rencontrées .....	35
1.3.	Pratiques d'irrigation .....	38
1.4.	Ressources en eau .....	40
1.5.	Solutions proposées par les producteurs/rices .....	41
1.6.	Perspectives.....	41
2.	Suivi des pratiques d'irrigation via l'installation de sondes de teneur en eau du sol .....	44
2.1.	Contexte et objectifs.....	44
2.2.	Matériel et méthode .....	44
2.3.	Résultat.....	45
2.4.	Perspectives.....	49
Chapitre 4 : Potentiel d'irrigation .....		51
1.	Objectif.....	51
2.	Matériel et données .....	51
3.	Méthodologie .....	52
3.1.	Échelles spatio-temporelles.....	52
3.2.	Carte des zones propices à l'irrigation horticole .....	52
3.3.	Estimation des besoins en eau d'irrigation .....	54
3.4.	Disponibilité des ressources en eau .....	56
3.5.	Élaboration de la carte du potentiel d'irrigation .....	57
3.6.	Élaboration de scénarios .....	58
Chapitre 5 : Modélisation des ressources en eau.....		59
1.	Introduction.....	59
2.	Zone d'étude.....	59
3.	Méthodologie .....	60
4.	Méthodologie de modélisation .....	63
5.	Outil de modélisation .....	64
5.1.	WEAP et MIKE HYDRO Basin.....	64
5.2.	MIKE SHE .....	66
6.	Perspectives.....	67
Chapitre 6 : Développement d'une méthodologie pour évaluer le potentiel d'irrigation des eaux de surface au Grand-Duché de Luxembourg .....		69
1.	Introduction.....	69
2.	Méthodologie de détermination du débit écologique.....	69
2.1.	Définition du débit écologique.....	69
2.2.	Calcul du débit écologique .....	69
3.	Matériel et méthodes.....	74

3.1.	Données disponibles .....	74
3.2.	Matériel .....	75
3.3.	Méthodologie de détermination de la disponibilité des eaux de surface pour l'irrigation.....	75
4.	Impacts des prélèvements d'eau sur le débit des cours d'eau.....	77
5.	Schéma de la méthodologie.....	78
6.	Exemple d'application : premiers résultats pour la rivière Syre .....	79
6.1.	Méthodes et hypothèses.....	79
6.2.	Résultats .....	80
7.	Limites de l'approche méthodologique proposée.....	82
8.	Perspectives.....	82
Chapitre 7 : Eau utile et recharge des eaux souterraines.....		84
1.	Introduction.....	84
1.1.	Objectif .....	84
1.2.	Les aquifères luxembourgeois .....	84
2.	Données et méthodologie d'estimation de la recharge .....	84
2.1.	Collecte des données.....	86
2.2.	Méthodologie d'estimation de la recharge .....	89
3.	Résultats .....	91
3.1.	Statistiques .....	91
3.2.	Evolution des paramètres du bilan hydrique.....	92
3.3.	Eau utile par station.....	92
3.4.	Spatialisation de l'eau utile.....	95
3.5.	Recharge .....	98
3.6.	Spatialisation de la recharge.....	103
4.	Perspectives : Année 2 .....	105
Chapitre 8 : estimation des besoins en eau .....		106
1.	Introduction.....	106
2.	Méthodologie.....	106
2.1.	Présentation des jeux de données météorologiques .....	106
2.2.	Estimation de l' $ET_0$ .....	106
2.3.	Estimation des besoins en eau des cultures.....	112
2.4.	Spatialisation .....	118
3.	Résultat.....	118
3.1.	Spatialisation de l' $ET_0$ .....	119
3.2.	Spatialisation des besoins en eau des cultures pour le secteur horticole.....	120
4.	Perspectives.....	124

4.1.	Calcul de l' $ET_0$ .....	124
4.2.	Spatialisation .....	124
4.3.	Besoin en eau des cultures.....	125
4.4.	Besoin en eau d'irrigation.....	125
Chapitre 9 :	Méthodologie sur la gestion de l'eau d'irrigation à la parcelle.....	126
1.	Introduction.....	126
2.	Intégration du cahier des charges .....	126
3.	Objectifs.....	126
4.	Qu'est-ce qu'une agriculture irriguée durable ?.....	126
4.1.	Le paradoxe de l'efficience .....	127
4.2.	Le paradoxe sectoriel.....	127
4.3.	Le paradoxe d'échelle .....	127
4.4.	Mise en pratique des trois paradoxes .....	127
5.	Comment « mieux » conseiller les usagers en irrigation ?.....	128
5.1.	Estimation des besoins en eau d'irrigation .....	128
5.2.	Outil d'aide à la décision.....	129
6.	Comment « bien » suivre les efficacités en irrigation ?.....	129
7.	Résumé.....	130
Références	.....	131
ANNEXES	.....	136
1.	Chapitre 2 .....	136
2.	Chapitre 4 .....	139
3.	Chapitre 5 .....	140
4.	Chapitre 7 .....	141

## Table des figures

Figure 1 : Évolution de la population luxembourgeoise sur les 20 dernières années (STATEC/CITIE, 2023).....	2
Figure 2 : Échelles de travail .....	4
Figure 3 : Chronogramme général des activités .....	4
Figure 4 : Représentation graphique des données manquantes pour la station de Reuler et pour l'ensemble de la fenêtre temporelle disponible.....	10
Figure 5 : Représentation graphique des données manquantes pour la station de Reuler et pour l'ensemble de la fenêtre temporelle disponible, focus des données manquantes pour les années 2002 et 2008.....	11
Figure 6 : Process flow de la méthode de la pondération inverse à la distance.....	21
Figure 7 : Carte du réseau des stations limnimétriques et les principaux cours d'eau mesurés .....	24
Figure 8 : Hydrogramme de l'Alzette à Ettelbrück entre 2002 et 2020 .....	26
Figure 9 : Hydrogramme des stations limnimétriques de l'Alzette pour l'année 2020 .....	26
Figure 10 : Débit moyen journalier de l'Alzette par rapport à la distance de la station limnimétrique à la source .....	26
Figure 11 : Corrélation entre précipitations et débit de l'Alzette à Ettelbrück.....	26
Figure 12 : Carte du réseau de sources et forages du Grand-Duché de Luxembourg .....	28
Figure 13 : Chronique piézométrique du forage FPZ-704-41 .....	29
Figure 14 : Fourniture journalière en eau potable du SEBES.....	31
Figure 15 : Consommation en eau potable par commune (l/hab/jour).....	33
Figure 16 : Volume d'eau potable vendu au secteur agricole par commune (m <sup>3</sup> /an) entre 2019 et 2022 .....	33
Figure 17 : Stations d'épuration biologiques (vert) et mécaniques (rouge).....	34
Figure 18 : Carte de la localisation des exploitations visitées .....	36
Figure 19 : Évolution de la répartition des exploitations dans le domaine horticole (STATEC) .....	37
Figure 20 : Évolution de la répartition des hectares cultivés dans le secteur horticole (STATEC) .....	37
Figure 21 : Évolution du nombre d'exploitations (STATEC).....	37
Figure 22 : Évolution de la répartition des hectares en légumes frais et fraises (STATEC) .....	37
Figure 23 : Enrouleur avec rampe d'irrigation.....	39
Figure 24 : Installation d'un tensiomètre comme indicateur d'aide à la décision d'irrigation .....	39
Figure 25 : Citerne de 24T pour le stockage de l'eau à Hünsdorf.....	40
Figure 26 : Citerne souple de 100m <sup>3</sup> à Munsbach .....	40
Figure 27 : Bassin de rétention des eaux de drainage et de lavage à Berchem .....	42
Figure 28 : Installation des capteurs par l'équipe IrriLux et le service de l'horticulture de l'ASTA.....	45
Figure 29 : Interface ZentraCloud, focus sur l'organisation en exploitation.....	46
Figure 30 : Interface ZentraCloud, focus sur la localisation géographique de l'équipement .....	46
Figure 31 : Interface ZentraCloud, focus sur la lecture des données récoltées. ....	47
Figure 32 : Résultat obtenu par les différentes sondes de teneurs en eau du sol, présentation en graphiques compilés via l'automatisation en Python.....	47
Figure 33 : Croissance de la culture de choux entre le 14/06/2023 (photo de gauche) et le 24/08/2023 (photo de droite) .....	48
Figure 34 : Croissance de la culture de panais entre le 15/06/2023 (photo de gauche) et le 24/08/2023 (photo de droite) .....	49
Figure 35 : Installation de sondes TEROS12 sans tarière spécifique .....	50
Figure 36 : Installation d'un mat pour garder une certaine visibilité vis-à-vis des machines agricoles. ....	50
Figure 37 : Données d'entrées pour l'élaboration de la carte du potentiel d'irrigation.....	51

Figure 38 : Création de la carte des zones propices à l'irrigation horticole ou 'land suitability map' (Danbara & Zewdie, 2022).....	55
Figure 39 : Calcul de l'eau de surface disponible pour l'irrigation .....	56
Figure 40 : Calcul de l'eau souterraine disponible pour l'irrigation.....	57
Figure 41 : Méthodologies pour la mise en place de la carte de potentiel d'irrigation .....	58
Figure 42 : Carte du bassin versant de la Syre .....	59
Figure 43 : Carte du (sous) bassins versant de la Syre et masses d'eau souterraine .....	60
Figure 44 : Logigramme du fonctionnement d'un bassin versant drainant (Briers et al., 2016).....	62
Figure 45 : Classification hiérarchique des types de bassin versant (Briers et al., 2016) .....	63
Figure 46 : Modélisation des ressources en eau .....	64
Figure 47 : Réseau de sites de demande et sources d'eau (WEAP) (Adgolign et al., 2016) .....	65
Figure 48 : Réseau de sites de demande et sources d'eau (MIKE HYDRO Basin) (Yu et al., 2017).....	65
Figure 49 : Exemple d'un bilan hydrique généré dans MIKE SHE .....	67
Figure 50 : Recharge de la zone saturée (SZ) (mm/j).....	68
Figure 51 : Échange entre eaux souterraines et eaux de surface (m <sup>3</sup> /s).....	68
Figure 52 : Hauteur piézométrique de la zone saturée (m).....	68
Figure 53 : Propriétés d'analyse des composants de flux environnementaux .....	72
Figure 54 : Analyse paramétrique et non paramétrique .....	73
Figure 55: Processus de mise en œuvre de l'IARI .....	74
Figure 56 : Schéma de la méthodologie de détermination des débits potentiels d'eau de surface disponible pour l'irrigation .....	79
Figure 57 : Courbe de durée d'écoulement pour la Syre à Mertert, tirée du logiciel IHA.....	80
Figure 58 : Débits extrêmement faibles 2010 – 2031 de la Syre à Mertert, tirés du logiciel IHA .....	81
Figure 59 : Valeurs d'altération hydrologique pour la période post-impact, tirées du logiciel IHA.....	81
Figure 60 : Altération du débit mensuel avec les limites de la RVA tirée du logiciel IHA .....	82
Figure 61 : Percentiles avant et après l'impact tirés du logiciel IHA.....	82
Figure 62 : Déroulement du processus d'évaluation du débit écologique dans les régions agricoles du Canada (Peters et al., 2012).....	83
Figure 63 : Carte de la distribution spatiale du débit du bassin de la Sabor au Portugal (Santos et al., 2018).....	83
Figure 64 : Carte hydrogéologique du Grand-Duché de Luxembourg (Service Géologique, 1998) .....	85
Figure 65 : Carte de la localisation des stations météo étudiées.....	88
Figure 66 : Schéma conceptuel du modèle de Thornthwaite .....	89
Figure 67 : Eau utile moyenne au Grand-Duché de Luxembourg.....	93
Figure 68 : Evolution temporelle des paramètres du bilan hydrique pour les stations de Fohren (à gauche) et Clemency (à droite) .....	93
Figure 69 : Hauteur piézométrique et eau utile à Waldbillig entre 2016 et 2020.....	94
Figure 70 : Précipitations à Waldbillig entre 2016 et 2020 .....	94
Figure 71 : Carte de la spatialisation de l'eau utile moyenne annuelle pour la période 2010 à 2020 ..	95
Figure 72 : Carte de la spatialisation des précipitations moyennes sur la période 2002 à 2020 des stations météo de l'ASTA et de l'AGE .....	96
Figure 73 : Carte de la spatialisation de l'eau utile normale (octobre 1981 - septembre 2011) (Gourdol, 2020).....	96
Figure 74 : Carte de la spatialisation de l'eau utile moyenne mensuelle (2010 - 2020).....	97
Figure 75 : Carte de la spatialisation de l'eau utile normale mensuelle (octobre 1981 - septembre 2011) (Gourdol, 2020) .....	97
Figure 76 : Carte des pentes (%).....	98
Figure 77 : Carte des types de sol.....	100

Figure 78 : Carte d'occupation du sol (2018).....	101
Figure 79 : Hauteur piézométrique et recharge mensuelle à Waldbillig entre 2016 et 2020 .....	102
Figure 80 : Carte de la spatialisation de la recharge moyenne annuelle de 2010 à 2020 .....	103
Figure 81 : Carte de la spatialisation de la recharge moyenne annuelle et aquifères.....	104
Figure 82 : Carte de la spatialisation de la recharge moyenne mensuelle de 2010 à 2020 .....	104
Figure 83 : Résumé du bilan des flux radiatifs pris en considération dans la méthodologie mise en place par la FAO dans son manuel 56 pour l'estimation de l'ET <sub>0</sub> (G. Allen et al., 1998) .....	108
Figure 84 : Calcul de l'ET <sub>c</sub> selon la méthode proposée par le manuel 56 de la FAO (G. Allen et al., 1998).....	112
Figure 85 : Évolution des valeurs de K <sub>c</sub> selon la période de croissance de la culture (G. Allen et al., 1998).....	113
Figure 86 : Carte de la spatialisation de l'ET <sub>0</sub> pour la période de 2010 à 2020 .....	119
Figure 87 : Cartes de la spatialisation de l'ET <sub>0</sub> mensuelle moyenne pour chaque mois de l'année estimée à partir des données de stations de 2010 à 2020.....	121
Figure 88 : Cartes de la spatialisation de l'évolution des écarts-types mensuels calculés pour la période 2010-2020 sur l'ensemble des variables disponibles.....	121
Figure 89 : Cartes de la spatialisation de l'ET <sub>0</sub> pour l'ensemble des stations pour la période de production horticole (5-9e mois) pour les années 2020 et 2021 .....	122
Figure 90 : Cartes de la spatialisation de l'ET <sub>0</sub> cumulées mensuelles pour les différents mois de production horticoles .....	122
Figure 91 : Carte de la spatialisation des cultures horticoles au sein du territoire du Grand-Duché de Luxembourg.....	123
Figure 92 : Cartes de la spatialisation des besoins en eau des cultures pour l'horticulture pour les années 2020 et 2021 selon la limite administrative des communes .....	123
Figure 93 : Schéma méthodologique pour la gestion des besoins en eau d'irrigation à la parcelle ...	130
Figure 94 : Évolution temporelle des paramètres du bilan hydrique des 21 stations sélectionnées..	141

## Table des Tableaux

Tableau 1 : Données requises à la mise en place de l'estimation des besoins en eau selon la méthodologie mise en place par la FAO dans son manuel 56 et disponibles pour les différentes stations météorologiques de l'ASTA .....	6
Tableau 2 : Données manquantes exprimées en % pour les différentes variables nécessaires à la mise en place de l'ET <sub>0</sub> selon la méthodologie proposée par la FAO dans son manuel 56 pour l'ensemble des stations et des périodes disponibles transmises par l'ASTA .....	8
Tableau 3 : Table de l'absence de valeurs d'ET <sub>0</sub> journalière (en %) pour la station de Reuler .....	11
Tableau 4 : Données manquantes exprimées en % pour les différentes variables des différentes stations pour l'ensemble des périodes disponibles selon la méthodologie des décades .....	13
Tableau 5 : Données manquantes exprimées en % pour les différentes variables des différentes stations pour la période de 2010 à 2020.....	14
Tableau 6 : Données manquantes exprimées en % pour les différentes variables des différentes stations pour la période de 2010 à 2020 pour les décades.....	15
Tableau 7 : Données manquantes exprimées en % pour les différentes variables des différentes stations pour la période de 2010 à 2020 et les mois 5,6,7,8 et 9 pour les journaliers .....	16
Tableau 8 : Données manquantes exprimées en % pour les différentes variables des différentes stations pour la période de 2010 à 2020 et les mois 5,6,7,8 et 9 pour les décades .....	17
Tableau 9 : Données manquantes exprimées en % pour les différentes variables des différentes stations pour la période de 2012 à 2022 et les mois 5,6,7,8 et 9 pour les décades .....	18
Tableau 10 : Données manquantes exprimées en % pour les différentes variables des différentes stations pour la période de 2012 à 2022 et les mois 5,6,7,8 et 9 pour les décades .....	19
Tableau 11 : Stations météo et coordonnées métriques EPSG : 2169 - LUREF .....	20
Tableau 12 : Stations les plus proches et pondération .....	22
Tableau 13 : Stations limnimétriques de l'AGE, cours d'eau mesuré, latitude et longitude, période de disponibilité des données.....	23
Tableau 14 : Statistiques descriptives du débit de l'Alzette .....	26
Tableau 15 : Maximum jaugés au 30/01/2023 .....	27
Tableau 16 : Codification nationale des sources et forages.....	28
Tableau 17 : Forages .....	29
Tableau 18 : Somme des prélèvements en eau potable entre 2019 et 2021 par secteur et par commune.....	31
Tableau 19 : Somme des prélèvements en eau potable entre 2019 et 2021 par aquifère .....	31
Tableau 20 : Récapitulatif des parcelles et des sondes Teros12 installées .....	45
Tableau 21 : Classification de l'aptitude des terres selon la FAO (Worqlul et al., 2015) .....	52
Tableau 22 : Indicateurs et méthodes de calcul .....	62
Tableau 23 : Processus modélisés dans WEAP et MIKE HYDRO Basin .....	65
Tableau 24 : Description des groupes hydrologiques (Peters et al., 2012).....	71
Tableau 25 : Description des composantes du flux environnemental (Greco et al., 2021).....	71
Tableau 26: Stations de jaugeage et disponibilité des données.....	75
Tableau 27 : Prélèvements d'eau de surface non agricole pour les années 2019, 2020, 2021.....	76
Tableau 28 : Méthodologies appliquées pour cet exemple .....	79
Tableau 29 : Stations pluviométriques de l'AGE et disponibilité des données .....	86
Tableau 30 : Réserve en eau facilement utilisable maximale (mm) .....	87
Tableau 31 : Nombre de données de précipitations journalières manquantes par année, par station .....	88
Tableau 32 : Coefficient de ruissellement en fonction du type de sol, de la pente et de l'occupation du sol (Mahmoud et al., 2014) .....	90

Tableau 33 : Moyenne et écart type de l'eau utile annuelle pour la période 2010 - 2020 .....	91
Tableau 34 : Eau utile cumulée par station par année (mm) .....	92
Tableau 35 : Coefficient d'infiltration par station météo.....	99
Tableau 36 : Recharges moyennes annuelles en mm de 2010 à 2020 .....	102
Tableau 37 : Valeurs de $K_c$ issues d'un extrait de la table du manuel 56 de la FAO (G. Allen et al., 1998) .....	113
Tableau 38 : Attribution des $K_c$ pour les différents types de cultures horticoles selon les catégories établies par le service de l'horticulture de l'ASTA.....	116
Tableau 39 : Attribution des proportions des cultures au sein des différentes catégories horticoles du parcellaire agricole à partir des données fournies par le service de l'horticulture de l'ASTA .....	117
Tableau 40 : Valeur de $K_{Cmidpond}$ pour les différentes grandes catégories horticoles du parcellaire agricole .....	118
Tableau 41 : Volumes estimés des besoins en eau des cultures pour l'horticulture luxembourgeoise .....	124
Tableau 42 : Tableau récapitulatif des données reçues pour la partie ressources en eau .....	136
Tableau 43 : Tableau récapitulatif des études reçues pour la partie ressources en eau.....	137
Tableau 44 : Tableaux récapitulatifs des données reçues pour la partie irrigation .....	138
Tableau 45 : Tableau récapitulatif des données nécessaires pour la méthodologie du potentiel d'irrigation .....	139
Tableau 46 : Tableau récapitulatif des données d'entrée du modèle MIKE SHE .....	140

## Table des équations

Équation 1 : Pourcentage de données manquantes.....	12
Équation 2 : Distance Euclidienne .....	20
Équation 3 : Pondération.....	20
Équation 4 : Pondération de la distance inverse .....	20
Équation 5 : Calcul de la hauteur piézométrique (m).....	29
Équation 6 : Ratio de cohérence (Saaty, 1977).....	53
Équation 7 : Bilan hydrogéologique.....	60
Équation 8 : Variation de la réserve en eau souterraine .....	61
Équation 9 : Formule de Maillet .....	61
Équation 10 : $p_{i,k}$ calcul (Peres & Cancelliere, 2016 ; Greco et al., 2021).....	74
Équation 11 : Calcul de l'indice IARI (Peres & Cancelliere, 2016).....	74
Équation 12 : Calcul de la valeur de l'IARI (Greco et al., 2021) .....	74
Équation 13 : Débit d'eau extrait pour l'irrigation.....	77
Équation 14 : Calcul des facteurs d'altération hydrologique (Tutoriel de l'IHA, s. d.) .....	78
Équation 15 : Estimation de la recharge.....	84
Équation 16 : Réserve utile du sol (Steffen, 2023).....	87
Équation 17 : Réserve en eau facilement utilisable journalière (mm) .....	89
Équation 18 : Évapotranspiration réelle journalière (mm) .....	90
Équation 19 : Eau utile journalière (mm) .....	90
Équation 20 : Coefficient d'infiltration à la station j.....	91
Équation 21 : Calcul de la recharge à la station j pour le jour i (mm).....	91
Équation 22 : Penman-Monteith.....	106
Équation 23 : Estimation de la pression de vapeur actuelle .....	107
Équation 24 : Constante psychrométrique .....	107
Équation 25 : Pression de vapeur saturante à la température de l'air.....	107
Équation 26 : Pression de vapeur saturante moyenne.....	107
Équation 27 : Pente de la courbe de pression de vapeur saturante.....	108
Équation 28 : Radiation extraterrestre .....	108
Équation 29 : Distance relative inverse terre-soleil.....	109
Équation 30 : Inclinaison solaire.....	109
Équation 31 : Angle de l'heure du coucher de soleil .....	109
Équation 32 : Radiation solaire ciel clair.....	109
Équation 33 : Radiation solaire nette à onde courte.....	109
Équation 34 : Radiation nette à onde longue.....	109
Équation 35 : Radiation nette .....	110
Équation 36 : Estimation de la pression atmosphérique à partir de l'altitude.....	110
Équation 37 : Estimation de la vitesse de vent à 2m du sol .....	110
Équation 38 : Estimation de la pression de vapeur actuelle .....	111
Équation 39 : Estimation de la radiation solaire à partir des valeurs de températures .....	111
Équation 40 : Estimation de l' $ET_0$ à partir de la formule de Hargreaves.....	111
Équation 41 : Volume total d'eau pour les besoins en eau des cultures.....	113
Équation 42 : $K_{Cmidpond}$ .....	115
Équation 43 : Calcul de l'ETc .....	118

# Chapitre 1 : Mise en contexte

## 1. Introduction

### 1.1. Contexte général

Avec une valeur de 85,51 milliards de dollars US en 2021, le Luxembourg se positionne en troisième position du classement mondial du PIB. Son PIB par habitant est de 133.590 dollars US contre 38.411,1 dollars US pour l'Union européenne (Groupe Banque Mondiale, 2023). Sur les 5 dernières années, le taux de croissance moyen du Luxembourg est de 2,1 %, soit quatre fois plus que dans la zone euro (Chamber of Commerce Luxembourg, 2023). En 2023, la valeur ajoutée brute du secteur agricole ne représente que 0,3 % de la VAB totale, composée de 86 % et 14 % respectivement pour le secteur tertiaire et l'industrie. Le secteur agricole emploie 3.800 personnes, ce qui représente 1,2 % de l'emploi luxembourgeois (European Commission, 2023b).

Même si la part du secteur agricole est faible dans l'économie luxembourgeoise, les zones agricoles occupent plus de la moitié du territoire (Allegrezza et al., 2013; European Commission, 2023a). En 2016, la surface agricole du GDL est de 52,6 % ou 131 384 ha (Le gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg, 2016). De plus, 73 % du Luxembourg est couvert par des zones rurales. Ainsi, avec une augmentation de 11,2 % de la population vivant dans les zones rurales entre 2015 et 2020, la campagne luxembourgeoise est attrayante en raison de sa petite taille (qui facilite la proximité entre les centres économiques), de la diversité de ses paysages et d'une bonne connexion à large bande. En ce qui concerne l'utilisation des sols, la surface agricole représente 53 % de la surface du pays, la surface forestière représentant 36 % (European Commission, 2023b). Le Luxembourg compte 1.970 exploitations agricoles, dont la moitié a une superficie supérieure à 50 ha. 6% de la surface agricole est cultivée en agriculture biologique, avec 114 agriculteurs biologiques en 2020 (European Commission, 2023b). Bien que ces dernières aient augmenté depuis les années 1990 (126.298 ha) (Le gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg, 2016), une diminution de la SAU (surface agricole utilisée) a été observée depuis les années 1960 avec une perte de 6.000 ha (en 2019).

### 1.2. Agriculture irriguée luxembourgeoise

Depuis les années 1960, le secteur agricole luxembourgeois a été largement influencé par la politique agricole commune. Cette influence s'est traduite par (1) une concentration des exploitations agricoles (Hauptert, 2009; Casali & Hauptert, 2012; Allegrezza et al., 2013); (2) une forte stabilisation de la répartition selon la spécialisation (Allegrezza et al., 2013); et (3) le développement de zones réservées principalement à l'élevage d'herbivores (Casali & Hauptert, 2012; Larue, 2012; Allegrezza et al., 2013). L'agriculture luxembourgeoise se concentre ainsi sur un nombre limité de produits (lait, viande, vin et céréales) (European Commission, 2023b).

En ce qui concerne l'horticulture, en 2008, il y avait 419 exploitations spécialisées dans l'horticulture ou les cultures permanentes (presque toutes des exploitations viticoles). Entre 1990 et 2016, l'horticulture (c'est-à-dire le maraîchage) est passée de 19 à 102 ha (Le gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg, 2016). Avec actuellement seulement 1% des exploitations agricoles engagées dans la culture de fruits et moins de 4% dans la culture de légumes, un nouveau soutien financier sera mis en place pour soutenir et encourager les producteurs de légumes et de fruits (MAVDR, 2022).

En 2020, selon la base de données AQUASTAT (FAO, 2021), aucune surface cultivée n'est irriguée. En réalité, les producteurs se sont récemment équipés de systèmes d'irrigation. Même s'il semble évident que les producteurs luxembourgeois ne sont pas encore prêts à affronter les changements climatiques et démographiques à venir, ils semblent être au début du changement.

Enfin, le plan agricole contribuera également à porter à 20 % la superficie consacrée à l'agriculture biologique d'ici à 2025 et à réduire de 50 % l'utilisation des pesticides d'ici à 2030 (European Commission, 2023b).

### 1.3. Pression sur les ressources en eau

Les ressources en eau du Luxembourg sont sous pression en raison de la croissance de la population, de l'économie et de l'agriculture. De plus, le changement climatique exacerbe ces pressions.

En 2022, le Luxembourg comptait 660.809 habitants, dont près de la moitié sont des résidents étrangers (313.407) (STATEC/CITIE, 2023). Au cours des 20 dernières années, sa population n'a cessé d'augmenter, passant de 448.300 habitants en 2002 à 660.809 habitants en 2022 (STATEC/CITIE, 2023). La densité de population a continué à augmenter, passant de 173,3 habitants/km<sup>2</sup> en 2002 à 255,5 habitants/km<sup>2</sup> en 2022, ce qui fait du Luxembourg l'un des pays les plus densément peuplés d'Europe (Le gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg, 2023). Une étude menée par MC Luxembourg en 2016 a estimé que la population luxembourgeoise approchera le million d'habitants et que les besoins en eau s'élèveront à 190.000 m<sup>3</sup>/jour d'ici 2040 (Management Consultants Luxembourg, 2016). Avec une augmentation de 11,2 % de la population vivant dans les zones rurales entre 2015 et 2020 (European Commission, 2023b), le prochain défi auquel le Luxembourg sera confronté consistera à fournir suffisamment d'eau potable.

De plus, ces chiffres ne prennent pas en compte les quelques 197.000 travailleurs frontaliers qui traversent la frontière quotidiennement (Le gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg, 2023).

Enfin, en ce qui concerne le changement climatique, le dernier rapport du GIEC a clairement établi, avec un niveau de confiance élevé, que (1) les températures, en raison des émissions de gaz à effet de serre, ont augmenté de 1,1 °C pour la période 2011-2020 par rapport à la période 1850-1900 en 2011-2020 et que (2) les causes humaines du changement climatique affectent déjà les conditions météorologiques et les extrêmes climatiques dans diverses régions du monde (Mukherji et al., 2023). L'influence humaine a probablement augmenté le risque d'événements extrêmes depuis les années 1950 et a réduit la sécurité alimentaire et affecté la sécurité de l'eau.

En outre, si les émissions de gaz à effet de serre se poursuivent, l'augmentation de la température devrait atteindre 1,5 °C dans un avenir proche, selon les meilleures projections. Même des "réductions profondes, rapides et soutenues des émissions de gaz à effet de serre" n'entraîneraient une baisse de la température que d'ici 20 ans. Enfin, les contributions nationales actuelles à la lutte contre le réchauffement climatique rendront difficile le maintien d'un scénario de réchauffement inférieur à 2°C.

## 2. IrriLux

C'est dans ce contexte de croissance démographique, de changements climatiques et de volonté d'expansion du secteur horticole luxembourgeois que le projet : « *Étude nationale au Grand-Duché de Luxembourg portant sur les possibilités résilientes d'accès et de l'utilisation d'eau d'irrigation dans l'horticulture* », intitulé IrriLux au sein de ce document, a été mis en place.

### 2.1. Objectif

Compte tenu du contexte luxembourgeois, l'objectif du projet IrriLux est de créer une carte de la superficie totale irrigable alimentée avec des ressources en eau conventionnelles et/ou non conventionnelles. Cette carte prendra en compte (1) l'ensemble des ressources en eau disponibles, (2) la gestion de l'eau au niveau de la parcelle (type de système d'irrigation, de culture ou de gestion du travail du sol) et (3) les différents obstacles rencontrés pour répondre aux besoins de la culture et de l'eau disponible.

Afin d'atteindre ces objectifs, plusieurs méthodologies sont à développer et plusieurs activités à réaliser. Ce document constitue ainsi le rapport annuel pour l'année 2022-2023, première année de réalisation du projet. Le chronogramme des différentes activités et échéances des objectifs sont développés dans la section 3. Les activités et méthodologies réalisées lors de cette première année de projet sont reprises au sein de ce document. Il est construit en différents chapitres pouvant se lire indépendamment.

## 2.2. Échelles de travail

Comme le montre la Figure 1, le projet sera mené suivant deux échelles de travail : locale et nationale. Les résultats obtenus à une échelle locale serviront de base pour réalimenter et détailler le travail effectué à l'échelle nationale.

Le travail à l'échelle nationale consistera en l'élaboration d'une carte du potentiel d'irrigation du Grand-Duché de Luxembourg. Une méthode a été développée durant l'année 1 du projet. Celle-ci est détaillée au Chapitre 4.

En ce qui concerne l'échelle locale, deux volets seront étudiés : d'une part la détermination des besoins en eau d'irrigation (cf. Chapitre 8) et le soutien aux agriculteurs via la mise en place d'un outil de gestion de l'eau, et d'autre part la modélisation hydrologique d'un bassin versant (cf. Chapitre 5). Ainsi, les enseignements tirés à l'échelle locale serviront à enrichir la carte du potentiel d'irrigation.

## 3. Chronogramme

Comme le montre la Figure 2, les différentes activités sont réparties en 3 pôles d'activités :

- Ligne supérieure : pôle d'activité partie irrigation,
- Ligne inférieure : pôle d'activités partie ressources en eau et,
- Ligne centrale : pôle d'interaction entre les pôles irrigation et ressources en eau.

Ainsi, lors de la première année, sont développés un modèle conceptuel du bassin versant de la Syre (cf. Chapitre 5), ainsi que le suivi d'une campagne agricole via l'installation de capteurs (cf. Chapitre 3). L'interaction entre ressources et besoin est développée à travers la carte de potentiel d'irrigation (cf. Chapitre 4). Pour les années à venir, le projet continuera avec l'élargissement des suivis et la mise en place d'un accompagnement technique des producteurs ainsi que l'intégration du modèle conceptuel dans un code de calcul (cf. Chapitre 5). Lors de la dernière année, l'outil développé pour la gestion des besoins en eau d'irrigation ainsi que le développement de différents scénarios seront transmis aux différentes administrations Luxembourgeoises.

**« Pour des raisons de confidentialité des données, le présent document ne peut être transmis dans son intégralité. C'est pour cela que seule l'introduction est conservée au sein de cette version. Pour toutes demandes complémentaires, veuillez-vous adresser au chargé de projet à l'adresse suivante : [Joost.Wellens@uliege.be](mailto:Joost.Wellens@uliege.be) . »**

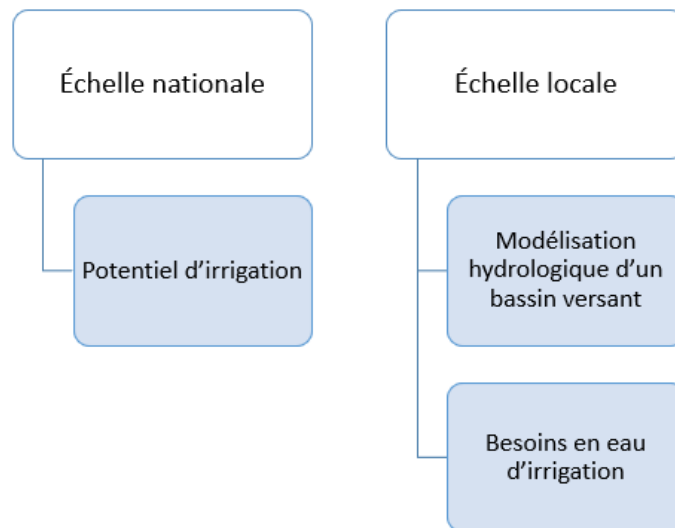


Figure 1 : Échelles de travail

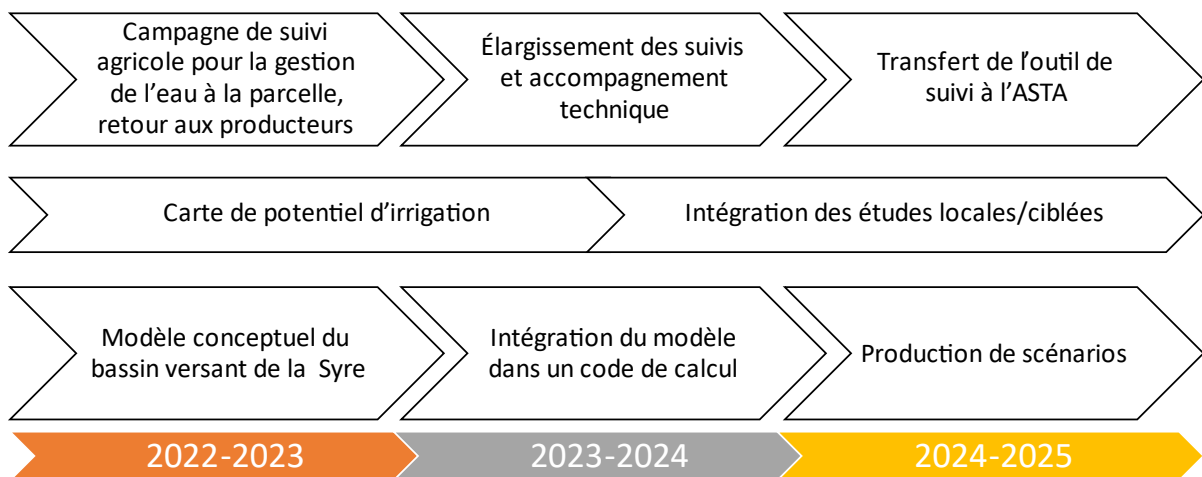


Figure 2 : Chronogramme général des activités