



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

**Rapport final interne
Octobre 2025**



Equipe de projet :

Cédric Magain & Guillaume Renard (Equal contribution)

Aurore Degré

Serge Brouyère

Caroline De Clerck

Jeroen Meersmans

Philippe Orban

Joost Wellens (coordinateur)

E-mails :

Cedric.Magain@uliege.be

Guillaume.Renard@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

« Ce document vise à exposer l'ensemble des actions menées et des résultats obtenus dans le cadre du projet IrriLux (2022–2025). Il s'agit d'un document à caractère interne, destiné à présenter les méthodologies appliquées et les principales conclusions du projet. »

Table des matières

Chapitre 1 : introduction : le projet IrriLux.....	1
1. Mise en contexte	1
2. Objectifs et échelles de travail	2
3. Échelles de travail	3
4. Chronogramme.....	3
5. Rapports et documents	4
Chapitre 2 : le potentiel d'irrigation à l'échelle nationale	6
1. Introduction.....	6
2. Matériel et méthodes.....	6
2.1. Échelles spatio-temporelles.....	7
2.2. Ressources en eaux	7
2.3. Intégration des besoins en eau.....	9
2.4. Distance entre la parcelle horticole et la ressource en eau	9
2.5. Confrontation entre besoins en eau et ressources en eau.....	11
3. Résultats et discussion	12
3.1. Besoins en eau.....	12
3.2. Ressources en eaux	15
3.3. Le potentiel d'irrigation	17
3.4. Cartes interactives du potentiel d'irrigation.....	26
4. Conclusion	35
5. Perspectives.....	37
Chapitre 3 : spatialisation des variables climatiques.....	38
1. Historique dans le projet.....	38
2. Introduction.....	38
3. Matériel	40
3.1. Stations météorologiques.....	40
4. Méthodes	41
4.1. Nettoyage des données d'entrées	42
4.2. Méthodes d'interpolation	42
4.3. Évaluation et sélection de la méthode d'interpolation	43
4.4. Schéma d'interpolation au pas de temps considéré	44
4.5. Estimation de l'évapotranspiration de référence	45
4.6. Analyse de la robustesse	46
5. Résultats et discussions.....	47

5.1.	Étude de cas : le Grand-Duché de Luxembourg.....	47
5.2.	Analyse de robustesse	54
6.	Conclusion	56
Chapitre 4 : aptitude des terres à recevoir une horticulture irriguée		58
1.	Introduction.....	58
1.1.	Historique dans le projet	58
2.	Matériel et méthodes.....	58
2.1.	Classes d'aptitude	58
2.2.	Facteurs considérés pour la mise en place de la carte des terres aptes à recevoir une agriculture irriguée	59
2.3.	Matrice de comparaison.....	78
3.	Résultats et discussion	85
3.1.	Construction participative	85
3.2.	Aptitude des terres.....	96
4.	Conclusion	99
5.	Perspectives.....	99
Chapitre 5 : besoins en eau des cultures et d'irrigation.....		102
1.	Introduction.....	102
2.	Matériel et méthodes.....	102
2.1.	Besoins en eau des cultures	102
2.2.	Besoin en eau d'irrigation : le logiciel AquaCrop.....	103
3.	Résultats et discussion	112
3.1.	Besoin en eau viticole.....	112
3.2.	Besoin en eau d'irrigation.....	113
4.	Conclusion	118
5.	Perspectives.....	118
Chapitre 6 : méthodes de déterminations des débits environnementaux et estimation des ressources en eau de surface		119
1.	Introduction.....	119
1.1.	Historique dans le projet	119
2.	Débits environnementaux (ou eflows)	119
2.1.	Méthodologies afin de définir des débits écologiques d'après la Directive-Cadre Européenne sur l'Eau.....	121
3.	Comparaison SBA et IHA/RVA	128
3.1.	Résultats et discussion SBA vs. IHA/RVA	130
3.2.	Conclusions sur la comparaison SBA-RVA	135
4.	Cadre conceptuel pour la construction de limites	135

4.1.	Benchmarking : cadre utilisé en Wallonie	137
5.	Méthodologie retenue dans le cadre du projet IrriLux	137
5.1.	Conclusions et perspectives concernant la détermination de débit environnemental ..	138
6.	Estimation des ressources en eaux de surface	139
6.1.	Cours d'eaux considérés	139
6.2.	Méthodologie d'estimation des volumes potentiellement prélevables	141
6.3.	Volumes estimés	143
Chapitre 7 : estimation des ressources en eaux souterraines		145
1.	Introduction et historique	145
2.	Données utilisées	146
2.1.	Données climatiques	146
2.2.	Données de sol	146
2.3.	Donnée d'occupation du sol	149
2.4.	Pentes	149
2.5.	Aquifères	149
2.6.	Données de prélèvements	154
3.	Méthodes mise en œuvre pour estimer la recharge et le volume d'eau souterraine disponible 155	
3.1.	Travaux antérieurs d'estimation de la recharge au Grand-Duché de Luxembourg	155
3.2.	Workflow général d'estimation de la recharge développé dans le cadre du projet	156
3.3.	Module 1 : Calcul du ruissellement initial	157
3.4.	Module 2 : Module de percolation et d'écoulement hypodermique	160
3.5.	Module 3 : Bilans par aquifères et estimation de l'eau disponible pour l'irrigation	162
4.	Résultats et discussion	164
4.1.	Module 1 : Ruissellement	164
4.2.	Module 2 : Percolation et écoulement hypodermiques	165
4.3.	Module 3 : Bilans par aquifères	170
4.4.	Limites et perspectives	171
Chapitre 8 : estimation des ressources en eau de récupération de ruissellement de surfaces imperméables		172
1.	Introduction	172
1.1.	Historique dans le projet	172
2.	Estimation des ressources en eau de récupération de ruissellement de surfaces imperméables	172
2.1.	Zones de récupération de ruissellement considérées	172
2.2.	Méthodologie d'estimation des volumes potentiellement récupérables	173
2.3.	Volumes estimés	173

Chapitre 9 : prélèvements existants et scénarios de consommation.....	175
1. Introduction.....	175
2. Prélèvements actuels	175
2.1. Source de données disponibles	175
2.2. Eaux souterraines	176
2.3. Part d'eau agricole dans l'eau potable.....	179
2.4. Mise en forme SIG	180
3. Scénarios de consommation	182
3.1. Présentation des scénarios MC Luxembourg	182
3.2. Scénarios d'évolution.....	182
3.3. Impact du scénario retenu sur les prélèvements en eau	185
4. Conclusion	186
Chapitre 10 : sélection des modèles climatiques futurs.....	187
1. Introduction.....	187
2. Matériel et méthodes.....	187
2.1. Modèles globaux	188
2.2. Modèles régionaux.....	190
2.3. Expériences climatiques	191
2.4. Résumé des données.....	194
2.5. Sélection des modèles CORDEX et CMIP5	196
2.6. Sélection des données climatiques issues des modèles MAR, CMIP5 et CORDEX.....	199
2.7. Traitement des données climatiques issues des modèles conservés.....	200
2.8. Correction par le biais.....	200
3. Résultats et discussion	202
3.1. Sélection des données climatiques issues des modèles MAR, CMIP5 et CORDEX.....	202
3.2. Intégration du modèle MAR à l'étude IrriLux	208
3.3. Correction par le biais.....	211
3.4. Sélection des scénarios futurs optimistes et pessimistes.....	211
4. Conclusion	213
Chapitre 11 : besoins et ressources en eau futurs et potentiel d'irrigation futur.....	214
1. Introduction.....	214
2. Matériel et méthodes.....	214
2.1. Données.....	214
2.2. Ressources en eau : eau de surface.....	215
3. Résultats et discussion	218
3.1. Précipitation et évapotranspiration de référence	218

3.2.	Besoins en irrigation futurs	222
3.3.	Ressources en eau	226
3.4.	Le potentiel d'irrigation dans le futur.....	229
4.	Conclusion	236
Références		237
Annexes		249
1.	Chapitre 3 : spatialisation des variables climatiques.....	249
	A. Relation entre la valeur moyenne de la station et l'altitude de l'ensemble de données synthétiques	249
	B. Mesures de précision et tableaux de densité variable du réseau	250
	C. Boxplots pour toutes les méthodes d'interpolation.....	251
	D. Heatmap des valeurs CM moyennes du test de méthodologie de l'ensemble de données synthétiques	253
2.	Chapitre 5 : besoins en eau des cultures et d'irrigation.....	257
3.	Chapitre 7 : estimation des ressources en eaux souterraines.....	260
4.	Chapitre 11 : le potentiel d'irrigation futur	262
4.1.	Précipitations et évapotranspiration de référence.....	262
4.2.	Besoins d'irrigation	265
4.3.	Volumes d'eau de surface.....	266
4.4.	Recharge	273
4.5.	Volumes d'eau disponible.....	278
4.6.	Surfaces potentiellement irrigables.....	279

Table des figures

Figure 1 : Échelles de travail	3
Figure 2 : Chronogramme général des activités	3
Figure 3 : Organigramme pour la mise en place de la carte de potentiel d'irrigation.....	7
Figure 4 : Intersection des ressources en eau par la distance en ligne directe	10
Figure 5 : La parcelle à irriguer (croix rouge) et la ressource en eau considérée (en bleu)	10
Figure 6 : Sélection du nœud de départ et du trajet entre la ressource en eau et la parcelle irriguée	10
Figure 7 : Illustration de la confrontation besoins-ressources-aptitudes des terres.....	12
Figure 8 : Répartition selon les cantons des superficies agricoles considérées dans le cadre du projet IrriLux.....	12
Figure 9 : Répartition selon les cantons des superficies agricoles lorsque 0,57% des parcelles sont sélectionnées.....	13
Figure 10 : Répartition des volumes d'eau viticole (m ³) pour les mois d'étés de l'année 2020.....	13
Figure 11 : Évolution des besoins en eau viticoles cumulés pour les mois d'étés.....	13
Figure 12 : Évolution des volumes d'irrigation nationaux pour la saison de production maraichère ...	14
Figure 13 : Évolution des volumes d'irrigation nationaux pour la saison de production maraichère selon les cantons	14
Figure 14 : Répartition spatiale des volumes d'irrigation par canton des années de la période historique (2010-2020) pour la saison de production maraichère.....	15
Figure 15 : Volumes médians potentiellement prélevables (m ³) dans les eaux de surface	16
Figure 16 : Volumes de ruissellement potentiellement prélevables (m ³) par Canton	16
Figure 17 : Volumes potentiellement prélevables d'eau souterraine (m ³)	16
Figure 18 : Volumes d'eau disponibles pour les six scénarios en eau de surface	17
Figure 19 : Surfaces irriguées par tronçon de cours d'eau avec prélèvements d'eau de 5% en période de besoin d'irrigation élevé.....	19
Figure 20 : Surfaces irriguées par tronçon de cours d'eau avec prélèvements d'eau de 5% en période hivernale.....	19
Figure 21 : Pourcentage de jours interdits aux prélèvements durant la période de besoins d'irrigation élevés par tronçon de cours d'eau	19
Figure 22 : Pourcentage de jours interdits aux prélèvements durant la période hivernale par tronçon de cours d'eau	20
Figure 23 : Superficies irriguées (ha) par les masses d' eaux souterraines	21
Figure 24 : Superficies irriguées (ha) par les eaux de ruissellement.	21
Figure 25 : Volumes d'eau disponible pour les combinaisons de scénario en eau de surface conservées, en eau souterraine et de ruissellement	23
Figure 26 : Hectares irrigués selon les scénarios de disponibilités de ressources en eau.....	23
Figure 27 : Volumes disponibles selon les cantons pour les simulations : (a) eau souterraine disponible, (b) eau de ruissellement disponible, (c) eau de surface, période d'irrigation, 5%, (d) eau de surface, période hivernale, 5%, (e) eau de ruissellement, souterraine et de surface, période d'irrigation, 5% et (f) eau de ruissellement, souterraine et de surface, période hivernale, 5%	24
Figure 28 : Hectares irrigués selon les cantons pour les simulations : (a) eau souterraine disponible, (b) eau de ruissellement disponible, (c) eau de surface, période d'irrigation, 5%, (d) eau de surface, période hivernale, 5%, (e) eau de ruissellement, souterraine et de surface, période d'irrigation, 5% et (f) eau de ruissellement, souterraine et de surface, période hivernale, 5%	25
Figure 29 : Carte interactive de l'outil d'aide à la décision sur le potentiel d'irrigation	26
Figure 30 : Couches disponible dans l'outil interactif d'aide à la décision pour le potentiel d'irrigation	27

Figure 31 : Agrégation des données selon l'unité d'agrégation, ici les cantons	28
Figure 32 : Variables disponibles pour les couches d'agrégation des données.....	28
Figure 33 : Aptitudes des terres pour le cas de pompage dans les eaux de la Clerve.....	30
Figure 34 : Besoins restants d'irrigation pour l'année 2012, année peu demandeuse en besoin d'irrigation, tous les types de ressources en eau sont considérés	30
Figure 35 : Surfaces irrigables par canton pour l'année 2019, année demandeuse en eau d'irrigation, tous les types de ressources en eau sont considérés.....	31
Figure 36 : Surfaces irrigables par canton pour l'année 2012, année peu demandeuse en eau d'irrigation, tous les types de ressources en eau sont considérés	32
Figure 37 : Besoins restants d'irrigation pour l'année 2019, année demandeuse en besoin d'irrigation, tous les types de ressources en eau sont considérés.....	32
Figure 38 : Aptitudes des terres pour le cas d'utilisation des eaux de ruissellement de la zone industrielle de Contern.....	33
Figure 39 : Besoins restants d'irrigation pour l'année 2012, année peu demandeuse en besoin d'irrigation, tous les types de ressources en eau sont considérés	33
Figure 40 : Ressources disponibles et besoins restants pour le Canton d'Esch-sur-Alzette (2012).....	34
Figure 41 : Scénario avec uniquement du ruissellement pour le Canton d'Esch-sur-Alzette (2012)	35
Figure 42 : Ressources disponibles et besoins restants pour la Moselle (2019 ; prélèvements en période de production)	36
Figure 43 : Ressources disponibles et besoins restants pour la Moselle (2012 ; prélèvements d'eau hivernale).....	36
Figure 44 : Emplacements des stations météorologiques incluses dans la base de données pour la spatialisation et l'estimation de l' ET_0 . L'emplacement du Luxembourg en Europe est indiqué par une forme rouge sur la carte dans le coin inférieur gauche.....	40
Figure 45 : Jours (en noir) où il n'est pas possible de calculer (a) l'évapotranspiration de référence ou (b) le bilan hydrique (c'est-à-dire $P-ET_0$), bien que les stations disposent de toutes les variables climatiques requises	41
Figure 46 : Flux de travail computationnel de l'interpolation et de la sélection quotidiennes, constituant la méthode JW	45
Figure 47 : Carte d'interpolation des résultats obtenus à partir de la méthode JW sur une grille de 1 km^2 pour les résultats quotidiens (a-c) et annuels cumulés moyens (c-d), l' ET_0 spatialisée étant calculée à l'aide de la méthode CI.....	48
Figure 48 : Fréquence relative de sélection des modèles en pourcentage pour les variables météorologiques étudiées pour le pays, avec TMAX : température maximale quotidienne de l'air, TMIN : température minimale quotidienne de l'air, RS : rayonnement solaire ; WS : vitesse du vent, RH : humidité relative de l'air et P : précipitations calculées selon la méthode JW pour la période 2010- 2020.....	49
Figure 49 : Boîtes à moustaches des moyennes nationales de l'indice composite (CM) pour les différentes variables météorologiques et les différents SIMS testés à l'aide de la méthode JW pour l'étude de cas (2010-2020).....	51
Figure 50 : Comparaison entre les données spatialisées de précipitation à travers le projet IrriLux et celles disponibles au sein des atlas hydro-climatiques	53
Figure 51 : Spatialisation de l'évapotranspiration annuelle cumulée, projet IrriLux.....	53
Figure 52 : Méthodes d'interpolation sélectionnées par variable météorologique appliquées à différents pourcentages de l'ensemble de données, avec TMAX : température maximale quotidienne de l'air, TMIN : température minimale quotidienne de l'air et P : précipitations ; IDW : pondération inverse de la distance, KEDD : krigeage avec dérive externe utilisant un semi-variogramme dynamique, KEDS utilisant un semi-variogramme statique, NatN : voisins naturels, OKD : krigeage	

ordinaire avec un semi-variogramme dynamique et OKS avec un semi-variogramme statique et enfin, TPS : méthode d'interpolation par spline.....	54
Figure 53 : Évolution de la RMSE moyenne du pays et du biais par rapport à l'évolution de la densité du réseau météorologique pour la période 2010-2020	55
Figure 54 : Réponse de la méthode JW à des cas spécifiques.....	56
Figure 55 : Classification de l'eau totale disponible du sol, carte de l'eau totale disponible du sol (mm) à gauche et des classes d'aptitude à droite	62
Figure 56 : Classification de la profondeur de sol, à gauche carte des profondeurs de sols (cm) et à droite, carte des classes d'aptitudes de la profondeur de sol	63
Figure 57 : Triangle de texture selon la classification USDA	64
Figure 58 : Classification de la texture de sol, à gauche carte des classes de texture de sols USDA et à droite, carte des classes d'aptitudes de la texture de sol.....	65
Figure 59 : Classification du pourcentage de carbone organique, à gauche la carte du pourcentage de carbone et à droite, la carte des classes d'aptitudes du carbone	66
Figure 60 : Classification du drainage du sol, à gauche la carte de drainage des sols et à droite, la carte des classes d'aptitudes du drainage du sol.....	68
Figure 61 : Classification de la pente, à gauche carte des pentes et à droite, la carte des classes d'aptitudes de la pente.....	68
Figure 62 : Classification de la distance au cours d'eau, à gauche la carte du réseau hydrographique issu de la classe 0 et à droite, la carte des classes d'aptitudes de la distance au cours d'eau	70
Figure 63 : STEP prioritaires pour la mise en place d'un traitement quaternaire (gauche), classes de distances aux STEP prioritaires (droite).....	70
Figure 64 : Classification de la distance aux aquifères, à gauche la carte des aquifères présentés, à droite la carte des classes d'aptitudes.....	71
Figure 65 : Ruissellement de toitures potentiellement récupérable et classes de distances associées	72
Figure 66 : Zones de protection de la nature (gauche) et classes de distances associées (droite)	74
Figure 67 : Classification du prix de l'eau, à gauche la carte du prix de l'eau par commune (les communes sans données sont hachurées) et à droite, la carte des classes d'aptitudes pour le prix de l'eau	75
Figure 68 : Classification de la densité démographique, à gauche la carte de la densité démographique par commune (hab./km ²) et à droite, la carte des classes d'aptitudes de la densité démographiques	76
Figure 69 : Classification de la disponibilité de la donnée, à gauche la carte de la disponibilité de la donnée par bassin versant et à droite, la carte des classes d'aptitudes de la disponibilité de la donnée	77
Figure 70 : Matrice de comparaison fictive, avec la plante : les propriétés de sols nécessaires à soutenir une production agricole, la goutte d'eau : la proximité aux ressources en eau et le symbole de paysage qui comprend notamment la pente	80
Figure 71 : Processus itératif de la mise en place de la matrice de comparaison	81
Figure 72 : Excel transmis aux experts luxembourgeois pour la proposition de nouveaux facteurs de comparaison et de leurs classes	81
Figure 73 : Excel transmis aux experts luxembourgeois pour la comparaison des facteurs, mise en place de la matrice de comparaison.....	81
Figure 74 : Décomposition en sous-matrices	82
Figure 75 : Exemple de résultat d'attribution de poids via la plateforme Mentimeter	83
Figure 76 : Question type du sondage sur l'attribution des poids des facteurs des propriétés agronomiques.....	84
Figure 77 : Réponses à la Q0 : Quels sont les facteurs importants à considérer pour une irrigation durable ?.....	86

Figure 78 : Réponses à la Q1 : Pour protéger les ressources en eau, quel secteur devra fournir le plus d'effort ?	86
Figure 79 : Positionnement des répondants quant à la priorisation de la mise en place de normes écologiques plus strictes et/ou l'expansion du secteur agricole	87
Figure 80 : Positionnement des répondants sur la vision future du type des exploitations agricoles..	87
Figure 81 : Positionnement des répondants sur les possibilités d'une expansion du secteur agricole et de l'utilisation des ressources en eau.....	87
Figure 82 : Favoriser une eau disponible ou une eau chère ?	87
Figure 83 : Hiérarchisation des groupes de facteurs	88
Figure 84 : Hiérarchisation des facteurs des propriétés agronomiques de la parcelle	89
Figure 85 : Hiérarchisation des facteurs liés à la proximité des ressources en eau	90
Figure 86 : Matrice de cohésion. Ratio de consistance : 0,0004	92
Figure 87 : Première matrice de comparaison des propriétés agronomiques de la parcelle pour les producteurs interrogés. Matrice incohérente, ratio de consistance : 0,164. Le jugement à modifier est mis en gras.....	93
Figure 88 : Seconde matrice de comparaison des propriétés agronomiques de la parcelle pour les producteurs interrogés. Ratio de consistance : 0,089. Le jugement modifié est mis en gras.....	93
Figure 89 : Matrice de comparaison des propriétés agronomiques de la parcelle pour les administrations luxembourgeoises. Ratio de consistance : 0,03	93
Figure 90 : Matrice de comparaison des propriétés de la parcelle des experts sols, ratio de consistance 0,01.....	94
Figure 91 : Matrice de comparaison consolidée des propriétés de la parcelle, incluant les sondages des experts sols, des producteurs et des administrations, ratio de consistance 0,02, avec CO : le carbone organique	94
Figure 92 : Matrice de comparaison de la distance aux ressources en eau consistante. Ratio de consistance 0,066, avec SI : la proximité aux zones d'activités économiques et STEP : la proximité aux stations d'épuration.....	95
Figure 93 : Matrice de comparaison des facteurs de gouvernance	95
Figure 94 : Cartes intermédiaires d'aptitudes des terres normalisées.....	97
Figure 95 : Histogramme des valeurs d'aptitudes normalisées pour les cartes intermédiaires d'aptitudes des terres.....	97
Figure 96 : Histogramme des valeurs LS (pour les parcelles agricoles uniquement)	98
Figure 97 : Carte d'aptitude des terres à soutenir une agriculture irriguée	100
Figure 98 : Carte des parcelles agricoles aptes à soutenir une agriculture irriguée	101
Figure 99 : Bilan hydrique de la parcelle réalisé en AquaCrop, intégration des précipitations et des caractéristiques de sols, tiré de Raes et al. (2023).....	103
Figure 100 : Propriétés hydriques d'entrées des parcelles agricoles étudiées.....	105
Figure 101 : Évolution des hectares cultivés en horticulture au Grand-Duché de Luxembourg (%), selon les données de l'administration des services techniques de l'agriculture.....	108
Figure 102 : Évolution des hectares cultivés en horticulture au Grand-Duché de Luxembourg (ha), selon les données de l'administration des services techniques de l'agriculture.....	108
Figure 103 : Parcelles horticoles considérées dans le cadre du projet IrriLux.....	109
Figure 104 : Culture de référence utilisée versus plusieurs cultures sur la même parcelle	110
Figure 105 : Schéma méthodologique pour la gestion des besoins en eau d'irrigation à la parcelle, tiré du rapport annuel 2023.....	112
Figure 106 : Estimation des besoins en eau viticole (mm) pour différentes fenêtres temporelles. Les chiffres des périodes représentent les mois de l'année	112

Figure 107 : Répartition spatiale des besoins en eau de la vigne (mm) pour la période estivale de l'année 2020	113
Figure 108 : Évolution des débuts (bleu), de fin (orange) et de longueurs (vert) de saison de production pour les parcelles considérées dans le cadre de l'étude IrriLux	114
Figure 109 : Répartition spatiale des début, fin et longueur de saison de production horticole (en jours juliens) sur le territoire luxembourgeois pour la période 2010-2020	115
Figure 110 : Besoins annuels d'irrigation pour la saison de production, période 2010-2020.....	116
Figure 111 : Besoins mensuels d'irrigation pour la saison de production, période 2010-2020.....	116
Figure 112 : Répartition spatiale des besoins en eau d'irrigation, des précipitations et de l'évapotranspiration de la saison de production horticole pour la période 2010-2020 (en mm)	117
Figure 113 : Illustration de l'hydrogramme annuel et des liens entre ses composantes avec divers éléments des écosystèmes des cours d'eaux, tiré de Hayes et al. (2018)	120
Figure 114 : Illustration de la « Sustainability Boundary Approach » (SBA) afin de définir des buts de gestion de l'eau durable, repris de Richter et al. (2010)	123
Figure 115 : Valeurs d'altérations hydrologique issues du logiciel IHA (en haut) et représentation schématique des distributions pré (vert) et post-impact (rouge) pour deux indicateurs (en bas)	126
Figure 116 : Composantes des débits environnementaux, tiré de Mathews et Richter (2007).....	127
Figure 117 : Bassins versants associés aux stations limnimétriques considérées pour la comparaison	129
Figure 118 : Débits moyens mensuels pour les trois simulations considérés et limites RVA de ± 1 écart-type (limites en noires). flow_100 correspond au débit inaltéré ; flow_90 à un prélèvement de 10% des débits et flow_80 à un prélèvement de 20% des débits.....	131
Figure 119 : Comparaisons des altérations hydrologiques pour une prise de 20% des débits et des limites RVA de 1ET ; Les graphiques correspondent aux stations de Clervaux (haut), Merttert (milieu) et Hunnebuer (bas)	132
Figure 120 : Débits mensuels moyens et limites RVA de ± 1 ET (gauche) ; débits mensuels médians et limites RVA de ± 17 percentiles (droite) ; station d'Hunnebuer	133
Figure 121 : Altérations hydrologiques pour une prise de 20% des débits simulées à la station d'Hunnebuer. Limites RVA fixées à ± 1 écart-type de la moyenne (haut) et ± 17 percentiles de la médiane (bas).....	134
Figure 122 : Illustration du framework ELOHA, tiré de Poff et al. (2010)	136
Figure 123 : Relations entre métrique de biodiversité de macroinvertébrés et métrique de débits, tiré de Hough et al. (2022)	136
Figure 124 : Possibles altérations écologiques face à des prises d'eaux. (1) Effet seuil pour une prise de débit très importante ; (2) Relation linéaire ; (3) Effet seuil pour une prise de débit faible	138
Figure 125 : Types des cours d'eaux présents au Grand-Duché.....	139
Figure 126 : Tronçons des cours d'eaux considérés comme un ressource potentielle pour l'irrigation	140
Figure 127 : Volumes médians potentiellement prélevables (m ³) dans les eaux de surface	144
Figure 128 : Valeurs de recharge moyenne annuelle sur la période 2010-2020 (estimation 2023-2024)	146
Figure 129 : Évaluation de la recharge des eaux souterraines en région Wallone pour la période 2000-2005, tiré de Sohier et al. 2012)	146
Figure 130 : Précipitations cumulées annuelles moyennes (2010-2020).....	147
Figure 131 : ET ₀ cumulé annuel moyen (2010-2020)	147
Figure 132 : Groupes hydrologiques et réserve utile des sols luxembourgeois.....	147
Figure 133 : Conductivité hydraulique à saturation (cm/j) et porosité totale (mm) des horizons ABC du sol	148

Figure 134 : Classes d'occupation du sol (LU) et pentes (m/m)	149
Figure 135 : Aquifères potentiellement exploitables pour l'agriculture d'après l'AGE et réseau de surveillance des niveaux d'eaux	153
Figure 136 : Formations sélectionnées pour comparaison entre les résultats de Sohier et al. (2012) et de la méthodologie développée dans le cadre du projet IrriLux.....	154
Figure 137 : Prélèvements annuels moyens dans les eaux souterraines d'eau potable pour la période 2019-2021 répertoriés dans le fichier « Wasserdesch ESEP_Prélèvements.xlsx » représentés en termes de volumes (gauche) et par secteur.....	155
Figure 138 : Workflow général de calcul des volumes d'eaux souterraines disponibles pour l'irrigation.	156
Figure 139 : Schéma de la partition des flux d'eaux dans le modèle utilisé dans le cadre du projet IrriLux.....	156
Figure 140 : Méthodologie du calcul du ruissellement	157
Figure 141 : Méthodologie du calcul de la percolation	163
Figure 142 : Calcul de l'eau souterraine disponible pour l'irrigation.....	164
Figure 143 : Cartes des valeurs de Curve Numbers I, II et III ajustés par la pente	164
Figure 144 : Ruissellement et précipitations efficaces annuelles moyennes (mm) pour la période 2010 – 2020	165
Figure 145 : Hauteurs de percolation et d'écoulement hypodermique du sol (mm).....	166
Figure 146 : Hauteurs de percolation et d'écoulement hypodermique des aquifères (mm)	167
Figure 147 : Diagramme en barres empilées des hauteurs (mm) et des volumes (Mm ³) de recharge annuelle	167
Figure 148 : Boxplots des hauteurs (mm) et des volumes (Mm ³) de recharge annuelle	168
Figure 149 : Comparaison des valeurs de recharges annuelles moyennes pour les aquifères du Dévonien (gauche) et Lias Supérieur & Dogger (droite).....	169
Figure 150 : Valeurs de recharge tirées d'EPICgrid pour les formations comparées ainsi que les valeurs de recharge du modèle ici développé	169
Figure 151 : Prélèvements agrégés par aquifères	170
Figure 152 : Volumes potentiellement prélevables par aquifères et par années	171
Figure 153 : Volumes d'eau de ruissellement annuels par canton (Mm ³) (gauche) et aires par canton de toitures potentiellement exploitables (ha) (droite).....	173
Figure 154 : Volumes de ruissellement potentiellement prélevables (m ³) par Canton et bâtiments considérés (en noir).....	174
Figure 155 : Schéma de répartition des données de prélèvements entre les différents usages	176
Figure 156 : Réseau de sources et forages du Grand-Duché de Luxembourg, tiré du rapport annuel 1 (2022-2023)	176
Figure 157 : Quantités moyennes prélevées d'eau souterraine en milliers de m ³ par secteur.....	179
Figure 158 : Volumes annuels médians 2019-2022 d'eau potable (issue d'eau de surface et souterraine) vendues au secteur agricole	180
Figure 159 : Prélèvements moyens en eau souterraine pour l'eau potable 2019-2021 répertoriés dans le fichier « Wasserdesch » représentés en termes de volumes et par secteur.....	181
Figure 160 : Prélèvements agrégés par aquifères et secteur	181
Figure 161 : Schéma des composantes du PIB, tiré de STATEC	183
Figure 162 : Scénarios démographiques en fonction de variables économiques, tiré de STATEC	183
Figure 163 : Projections démographiques en fonction des scénarios STATEC	184
Figure 164 : Extension du scénario 3 STATEC	185
Figure 165 : Estimation des prélèvements futurs dans les aquifères utilisés dans le potentiel d'irrigation	186

Figure 166 : Méthodologie de sélection des modèles climatiques dans le cadre du projet IrriLux	189
Figure 167 : Les modèles régionaux CORDEX-MAR contraints par les modèles globaux du CMIP5- CMIP6	190
Figure 168 : Les défis socio-économiques proposés par les expériences CMIP6 (tiré de O'Neil et al. (2014))	194
Figure 169 : Résolution des pixels couvrant le Grand-Duché de Luxembourg pour les différents ensembles et modèles climatiques étudiés	194
Figure 170 : Méthodologie pour la sélection des variables climatiques issues des modèles disponibles pour le projet CORDEX et CMIP5, plateforme Copernicus	196
Figure 171 : Modèles climatiques régionaux disponibles pour l'évaluation. Ces modèles possèdent les variables requises à la mise en place de l'estimation de l'ET ₀ et de précipitations.....	204
Figure 172 : Graphiques des modèles climatiques pour les variables de précipitation, d'évapotranspiration, de température maximum et minimum pour 4 scénarios climatiques de l'ensemble CORDEX, RCP85 : réchauffement planétaire avec un forçage radiatif à 8.5 W/m ² ; RCP45 à 4,5 ; RCP26 à 2.6; historical : les données historiques des modèles climatiques sélectionnés	206
Figure 173 : Analyse des différents ensembles climatiques dans le cadre de l'étude du climat à Contern, période de production, l'axe des y représente des quantités d'eau en mm, l'axe des x : des dates, avec en noir les données historiques, en bleu les données observées, en jaune les scénarios RCP26 et SSP126, en orange les scénarios RCP45 et ssp370 et en rouge les scénarios RCP85 et SSP585	207
Figure 174 : Interpolation spatiale des sorties climatiques du modèle MAR.....	209
Figure 175 : Évolution temporelle annuelle des différentes variables climatiques d'intérêt pour les modèles MAR, les lignes pleines représentent la médiane des différents modèles. Les limites des zones colorées représentent le percentile 10 et 90, Avec OBS : le climat observé, ERA5 : le modèle MAR contraint aux limites par les données de réanalyse ERA5, histo : les données historiques simulées par les modèles MAR, ssp126-370-585 : les données futures simulées par le modèle MAR pour des scénarios optimistes à pessimistes.....	210
Figure 176 : Évolution temporelle de la moyenne annuelle de la radiation solaire journalière	211
Figure 177 : Évolution temporelle des moyennes annuelles des températures maximum et minimum journalières corrigées par le biais et des sommes annuelles de l'évapotranspiration de référence et du déficit pour les modèles MAR, les lignes pleines représentent la médiane des différents modèles. Les limites des zones colorées représentent le percentile 10 et 90, Avec OBS : le climat observé, histo : les données historiques simulées par les modèles MAR, SSP370-585 : les données futures simulées par le modèle MAR pour les scénarios conservés.....	212
Figure 178 : Sélection des modèles climatiques MAR pessimistes et optimistes	212
Figure 179 : Histogramme des valeurs des coefficients de détermination (R ²) des relations entre volumes potentiellement prélevables des scénarios prod5 et off 5 et des débits annuels cumulés..	217
Figure 180 : Différences entre la période future considérée et historique d'évapotranspiration cumulée annuelle moyenne (en mm) pour deux scénarios climatique futurs (ssp370, ssp585), deux périodes futures (proche et lointaine) et deux modèles climatiques : optimiste (ECearth) et pessimiste (Noresm).....	219
Figure 181 : Différences entre la période future considérée et historique de précipitation cumulée annuelle moyenne (en mm) pour deux scénarios climatique futurs (ssp370, ssp585), deux périodes futures (proche et lointaine) et deux modèles climatiques : optimiste (ECearth) et pessimiste (Noresm).....	220
Figure 182 : Différences entre la période future considérée et historique du déficit hydrique climatique (P-ET ₀) annuel moyen (en mm) pour deux scénarios climatique futurs (ssp370, ssp585),	

deux périodes futures (proche et lointaine) et deux modèles climatiques : optimiste (ECearth) et pessimiste (Noresm).....	221
Figure 183 : Évolution des précipitations durant la saison de production horticole.....	224
Figure 184 : Évolution de l'évapotranspiration de référence durant la saison de production horticole	224
Figure 185 : Évolution de la date de début de production de la saison horticole.....	224
Figure 186 : Évolution de la date de fin de production de la saison horticole	224
Figure 187 : Évolution de la longueur de la période de production.....	224
Figure 188 : Évolution des besoins en eau d'irrigation.....	224
Figure 189 : Différence des moyennes de besoins d'irrigation (en mm) entre la période de référence (2010-2020) et les périodes futures proche (2030-2049) et lointaine (2070-2089) pour le territoire luxembourgeois.....	225
Figure 190 : Volumes potentiellement prélevables en eau de surface pour les différents tronçons de cours d'eau pour les différents scénarios climatiques	227
Figure 191 : Évolution des volumes disponibles pour les aquifères potentiellement exploitables	228
Figure 192 : Volumes de ruissellement médians par cantons (Mm ³) pour les différents scénarios futurs.	229
Figure 193 : Moyennes des médianes des volumes relatifs (en %) entre la période future considérée et la période historique pour les différents cantons luxembourgeois, avec le détail des scénarios pour les symboles de la colonne gauche : le modèle Noresm et de la colonne droite : le modèle ECearth232	
Figure 194 : Moyennes des médianes des surfaces potentiellement irrigables relatives (en %) entre la période future considérée et la période historique pour les différents cantons luxembourgeois, avec le détail des scénarios pour les symboles de la colonne gauche : le modèle Noresm et de la colonne droite : le modèle ECearth.....	233
Figure 195 : Évolution des volumes d'eau dans le futur, les valeurs médianes sont renseignées en rouge et le changement relatif par rapport à la période historique en bleu	234
Figure 196 : Évolution des surfaces potentiellement irrigables dans le futur, les valeurs médianes sont renseignées en rouge et le changement relatif par rapport à la période historique en bleu	235
Figure 197 : Répartition spatiale des besoins d'irrigation, de précipitation, d'évapotranspiration, de début, fin et longueur de la saison horticole pour les années de la période de référence 2010-2020	259
Figure 198 : Évapotranspiration de référence cumulée annuelle moyenne(en mm) pour les périodes futures proches (2030-2049) et lointaines (2070-2089), pour un modèle optimiste (ECearth) et pessimiste (Noresm), et deux scénarios futurs : ssp370 et ssp585.....	262
Figure 199 : Précipitation cumulée annuelle moyenne (en mm) pour les périodes futures proches (2030-2049) et lointaines (2070-2089), pour un modèle optimiste (ECearth) et pessimiste (Noresm), et deux scénarios futurs : ssp370 et ssp585.....	263
Figure 200 : Déficit hydrique annuel moyen (en mm) pour les périodes futures proches (2030-2049) et lointaines (2070-2089), pour un modèle optimiste (ECearth) et pessimiste (Noresm), et deux scénarios futurs : ssp370 et ssp585.....	264
Figure 201 : Évolution des moyennes de la période historique (2010-2020), futur proche (2030-2049) et lointain (2070-2089) des besoins d'irrigations (en mm) pour les scénarios ssp370-585 selon les modèles climatiques Noresm et ECearth.	265
Figure 202 : Nuages de points et régressions linéaires pour off5 et les débits annuels cumulés.....	266
Figure 203 : Nuages de points et régressions linéaires pour off5 et les débits annuels cumulés.....	267
Figure 204 : Boxplots des volumes potentiels par tronçons de cours d'eau (Mm ³) pour le scenario Noresm ssp370 proche en période d'irrigation.....	268

Figure 205 : Boxplots des volumes potentiels par tronçons de cours d'eau (Mm ³) pour le scenario Noresm ssp370 loin en période d'irrigation.....	268
Figure 206 : Boxplots des volumes potentiels par tronçons de cours d'eau (Mm ³) pour le scenario Noresm ssp585 loin en période d'irrigation.....	268
Figure 207 : Boxplots des volumes potentiels par tronçons de cours d'eau (Mm ³) pour le scenario Noresm ssp585 loin en période d'irrigation.....	269
Figure 208 : Boxplots des volumes potentiels par tronçons de cours d'eau (Mm ³) pour le scenario ECearth ssp370 proche en période d'irrigation.....	269
Figure 209 : Boxplots des volumes potentiels par tronçons de cours d'eau (Mm ³) pour le scenario ECearth ssp370 loin en période d'irrigation.....	269
Figure 210 : Boxplots des volumes potentiels par tronçons de cours d'eau (Mm ³) pour le scenario ECearth ssp585 proche en période d'irrigation.....	270
Figure 211 : Boxplots des volumes potentiels par tronçons de cours d'eau (Mm ³) pour le scenario ECearth ssp585 loin en période d'irrigation.....	270
Figure 212 : Boxplots des volumes potentiels par tronçons de cours d'eau (Mm ³) pour le scenario Noresm ssp370 proche en période hivernale	270
Figure 213 : Boxplots des volumes potentiels par tronçons de cours d'eau (Mm ³) pour le scenario Norsems ssp370 loin en période hivernale.....	271
Figure 214 : Boxplots des volumes potentiels par tronçons de cours d'eau (Mm ³) pour le scenario Noresm ssp585 proche en période hivernale	271
Figure 215 : Boxplots des volumes potentiels par tronçons de cours d'eau (Mm ³) pour le scenario Noresm ssp585 loin en période hivernale.....	271
Figure 216 : Boxplots des volumes potentiels par tronçons de cours d'eau (Mm ³) pour le scenario ECearth ssp370 proche en période hivernale	272
Figure 217 : Boxplots des volumes potentiels par tronçons de cours d'eau (Mm ³) pour le scenario ECearth ssp370 loin en période hivernale.....	272
Figure 218 : Boxplots des volumes potentiels par tronçons de cours d'eau (Mm ³) pour le scenario ECearth ssp585 proche en période hivernale	272
Figure 219 : Boxplots des volumes potentiels par tronçons de cours d'eau (Mm ³) pour le scenario ECearth ssp585 loin en période hivernale.....	273
Figure 220 : Volumes potentiels par aquifères et par année (m ³) pour le scenario Noresm ssp370 proche.....	273
Figure 221 : Volumes potentiels par aquifères et par année (m ³) pour le scenario ECearth ssp370 proche.....	274
Figure 222: Volumes potentiels par aquifères et par année (m ³) pour le scenario Noresm ssp585 proche.....	274
Figure 223 : Volumes potentiels par aquifères et par année (m ³) pour le scenario ECearth ssp585 proche.....	275
Figure 224 : Volumes potentiels par aquifères et par année (m ³) pour le scenario Noresm ssp370 loin	275
Figure 225 : Volumes potentiels par aquifères et par année (m ³) pour le scenario ECearth ssp370 loin	276
Figure 226 : Volumes potentiels par aquifères et par année (m ³) pour le scenario Norsems ssp585 loin	276
Figure 227 : Volumes potentiels par aquifères et par année (m ³) pour le scenario ECearth ssp585 loin	277

Figure 228 : Évolution des volumes d'eau disponibles dans le futur pour les deux modèles climatiques retenus, les valeurs médianes sont renseignées en rouge et le changement relatif par rapport à la période historique en bleu	278
Figure 229 : Évolution des volumes d'eau disponibles dans le futur pour les deux modèles climatiques retenus, les valeurs médianes sont renseignées en rouge et le changement relatif par rapport à la période historique en bleu	279

Table des Tableaux

Tableau 1 : Objectifs spécifiques du projet IrriLux	5
Tableau 2 : Scénarios de prélèvements d'eau de surface en fonction du pourcentage de débit prélevé et de la période considérée	8
Tableau 3 : SIMs testées avec leurs points forts et leurs points faibles.....	43
Tableau 4 : Les cas artificiels sont étiquetés à l'aide d'un code dont la première lettre indique l'écart type des valeurs d'entrée : « S » pour petit et « B » pour grand. La deuxième lettre désigne la configuration du réseau : « S » pour systématique et « R » pour aléatoire. Le chiffre qui l'accompagne représente le nombre de réseaux. Chaque configuration est appliquée à trois scénarios : (i) points distribués aléatoirement, (ii) points corrélés spatialement, y compris les stations de haute altitude, et (iii) points corrélés spatialement, à l'exclusion des stations de haute altitude.....	47
Tableau 5 : Configurations des emplacements des stations, avec les frontières LU (Luxembourg), DE (Allemagne), FR (France) et BE (Belgique) utilisées pour définir les différentes configurations du réseau artificiel.....	47
Tableau 6 : Valeurs Q1-Q3 des données observées, RMSE moyen, biais, métrique composite et métrique composite relative (divisée par l'écart interquartile) des différentes variables météorologiques pour le pays, avec TMAX : température maximale quotidienne de l'air, TMIN : température minimale quotidienne de l'air, RS : rayonnement solaire ; WS : vitesse du vent à 2 m, RH : humidité relative de l'air à 2 m et P : précipitations calculées selon la méthode JW pour la période 2010-2020	50
Tableau 7 : Données ponctuelles d'évapotranspiration cumulée annuelle issue des atlas hydro-climatiques et du projet IrriLux	52
Tableau 8 : Évapotranspiration cumulée annuelle pour des stations limitrophes belges incluant la radiation solaire.....	52
Tableau 9 : Facteurs considérés pour la matrice de comparaison	59
Tableau 10 : Définition des facteurs considérés dans le cadre du projet IrriLux.....	60
Tableau 11 : Classes d'adaptabilités pour le facteur de réserve utile du sol.....	62
Tableau 12 : Couche unique développée à partir des classes d'aptitudes de profondeur de sol (en cm) pour l'enracinement de Sys et al(1993).....	62
Tableau 13 : Couche unique conservée pour les classes d'aptitudes de la profondeur de sol à recevoir de l'horticulture.....	63
Tableau 14 : Proportion des différentes classes USDA sur le sol luxembourgeois	64
Tableau 15 : Classes d'aptitude pour la texture de sols dans le cadre du projet IrriLux	65
Tableau 16 : Classes d'aptitudes des terres à recevoir une agriculture irriguée pour le carbone organique.....	66
Tableau 17 : Classification des classes de drainage (CNSW) en classes d'aptitude	67
Tableau 18 : Construction des classes d'aptitude des pentes	67
Tableau 19 : Typologie des cours d'eaux luxembourgeois	69

Tableau 20 : Classes des bâtiments du plan cadastral numérisé luxembourgeois. Les classes retenues sont distinguées en gras	73
Tableau 21 : Arguments pour ou contre l'utilisation de la carte du prix de l'eau	75
Tableau 22 : Arguments pour ou contre l'utilisation de la carte de densité démographique	76
Tableau 23 : Données utilisées pour la carte des données manquantes	77
Tableau 24 : Classes d'aptitude pour les critères classifiés	78
Tableau 25 : Intensité de l'importance d'un critère par rapport à l'autre. Traduit et adapté de Gonfa et al. (2021).....	79
Tableau 26 : Attribution des poids pour la matrice de cohésion, avec Pr : les propriétés de la parcelle, G : la gouvernance, PRE : la proximité aux ressources en eau et P les participants.....	88
Tableau 27 : Attribution des poids pour la matrice des propriétés agronomiques de la parcelle, avec T : textures de sols, Pr : la profondeur de sol, RU : la réserve utile, Dr : le drainage, CO : le carbone organique, Pe : la pente et P les participants	89
Tableau 28 : Résultats de l'attribution des importances relatives pour la proximité aux ressources en eau, avec ESU : les eaux de surface, ESO : les eaux souterraines, SI : les surfaces imperméables, STEP : les stations d'épuration et P les participants.....	90
Tableau 29 : Résultats de l'attribution des importances relatives des facteurs de gouvernances conservés. Le chiffre « 0,2 » barré représente le jugement retiré après discussions, avec DZP : la distance aux zones protégées, Ddo : la disponibilité des données et P les participants.....	90
Tableau 30 : Résultats de l'attribution des importances relatives pour la matrice de la parcelle par les experts sols, avec T : textures de sols, Pr : la profondeur de sol, RU : la réserve utile, Dr : le drainage, CO : le carbone organique, Pe : la pente et P les participants.....	91
Tableau 31 : Résultats de l'attribution des importances relatives pour la matrice de la parcelle par les producteurs, avec T : textures de sols, Pr : la profondeur de sol, RU : la réserve utile, Dr : le drainage, CO : le carbone organique, Pe : la pente et P les participants.....	91
Tableau 32 : Résumé des différents poids déduits des différentes matrices de comparaisons par paires	96
Tableau 33 : Définition des paramètres de modélisation AquaCrop.....	110
Tableau 34 : Catégories de méthodologies pour la détermination de débits environnementaux, tiré de DCE Guidance n°31 (European Commission, 2015).....	122
Tableau 35 : Résumé des normes de débits environnementaux définis dans les cas d'études considérés, repris de Richter et al. (2012).....	123
Tableau 36 : Groupes de paramètres et indicateurs associés, repris de Richter et al. (1996)	124
Tableau 37 : Cours d'eaux étudiés et typologie, station limnimétriques et période de données associées.....	128
Tableau 38 : Typologie des cours d'eaux au Grand-Duché de Luxembourg	139
Tableau 39 : Stations limnimétriques de l'AGE, cours d'eau mesuré, période de disponibilité des données.....	140
Tableau 40 : Scénarios de prélèvements d'eau de surface en fonction du pourcentage de débit prélevé et de la période considérée.....	141
Tableau 41 : Résumé des règles de simulations de prélèvements de débits	142
Tableau 42 : Statistiques sur les valeurs de débit (m ³ /s).....	143
Tableau 43 : Gammes de valeurs des paramètres hydrogéologiques	152
Tableau 44 : Masses d'eau souterraines belges et luxembourgeoises comparées	153
Tableau 45 : Correspondance classes LC LIS et SCS-CN	158
Tableau 46 : Correspondance entre groupe hydrologique, classe d'occupation du sol et valeur de CNII. Les chiffres entre crochets correspondent à l'encodage des valeurs sous format raster.....	158
Tableau 47 : Limites de précipitations pour les classes de conditions antérieures d'humidité	158

Tableau 48 : Codification nationale des sources et forages.....	176
Tableau 49 : Prélèvements recensés dans le fichier « Wasserdech » sans code national existant. La double ligne marque la séparation entre les captages considérés et les non-considerés. PA signifie partie affleurante. En rouge sont les codes nationaux créés pour la mise en forme SIG.....	178
Tableau 50 : Modalité d'évolution de la demande en eau potable par secteur, selon MC Luxembourg	182
Tableau 51 : Population moyenne projetée en 2070 et écarts par rapport à cette moyenne	184
Tableau 52 : Population aux périodes sélectionnées et ratios par rapport à la période de référence	185
Tableau 53 : Sorties de simulations climatiques téléchargées pour la simulation des besoins en eau d'irrigation selon l'ensemble CMIP5 du cds datastore, avec RCP : Representative Concentration Pathways : profils représentatifs d'évolution de concentration de gaz à effet de serre, RCP26 : une augmentation du forçage radiatif de 2.6 W/m ² d'ici à 2100, RCP45 : de 4.5 W/m ² et RCP85 : de 8.5 W/m ²	188
Tableau 54 : Modèles MCG et MCR disponibles pour le domaine EURO-11.....	190
Tableau 55 : Sorties des simulations climatiques téléchargées pour la simulation des besoins en eau d'irrigation pour l'ensemble MAR	191
Tableau 56 : Résumé des ensembles et modèles considérés dans le cadre de cette étude	195
Tableau 57 : Modèles climatiques régionaux européens conservés (CORDEX), variables pour l'estimation de l'ET ₀ et les précipitations disponibles	202
Tableau 58 : Sélection des combinaisons MCR-GCM (ensemble CORDEX) pour le téléchargement des variables climatiques historiques et futures, basé sur (Copernicus Climate Change Service, 2024) ..	203
Tableau 59 : Score total pour les différentes variables des modèles climatiques futurs	205
Tableau 60 : Score total (somme de précipitation, ET ₀ , Tmax et Tmin) pour les différents modèles climatiques testés.....	205
Tableau 61 : Les x meilleurs modèles sélectionnés, ici les modèles avec un RM supérieur à 0.5.....	205
Tableau 62 : Modèles, scénarios, périodes de références climatiques utilisées pour l'estimation des besoins et ressources en eau futures.....	215
Tableau 63 : Coefficients de déterminations des relations entre débits annuels et volumes potentiellement prélevables par saison	217
Tableau 64 : Régressions et coefficients de détermination R ² pour les périodes de production (prod) et hors production	217
Tableau 65 : Correspondance entre les cultures et le groupe de culture pour le parcellaire de l'année 2020.....	260

Table des équations

Équation 1 : Méthode d'estimation des ressources en eaux souterraines.....	8
Équation 2 : Calcul des volumes d'eaux potentiellement récoltés annuellement par récupération des ruissellements	8
Équation 3 : Conversion des besoins en eau en volume d'irrigation.....	9
Équation 4 : Conversion des besoins en eau d'irrigation net en brute	9
Équation 5 : Calcul du Z-score pour le retrait des valeurs aberrantes de la base de données.....	42
Équation 6 : Calcul de la métrique composite d'évaluation de la performance des interpolations spatiales.....	44
Équation 7 : Calcul du RMSE.....	44
Équation 8 : Calcul du biais.....	44
Équation 9 : Calcul de la métrique composite relative pour la comparaison des performances entre différentes variables climatiques.....	44
Équation 10 : Estimation d'évapotranspiration de référence selon la méthode de Penman-Monteith	45
Équation 11 : Estimation de l'eau totale disponible du sol	61
Équation 12 : Pourcentage de limon par horizon	63
Équation 13 : Moyenne pondérée sur le profil de sol, exemple du limon	64
Équation 14 : Attribution du poids des facteurs	79
Équation 15 : Formule pour la mise en place de la carte d'aptitude des terres.....	80
Équation 16 : Calcul de l'index de consistance	80
Équation 17 : Calcul de ratio de cohérence.....	80
Équation 18 : Agrégation des importances relatives données pour un même facteurs par les différentes personnes sondées via moyenne géométrique	85
Équation 19 : Calcul de l'aptitude des terres.....	96
Équation 20 : Estimation des besoins en eau des vignobles	102
Équation 21 : Estimation de la teneur en eau à la capacité au champ.....	104
Équation 22 : Estimation de la teneur en eau à la saturation	104
Équation 23 : Définition des Growing Degree-Days	106
Équation 24 : Définition de la température moyenne.....	106
Équation 25 : Définition de la température maximum ajustée	107
Équation 26 : Réserve utile du sol	111
Équation 27 : Réserve facilement utilisable	111
Équation 28 : Calcul de l'altération hydrologique.....	125
Équation 29 : Moyenne pondérée sur le profil de sol	148
Équation 30 : Facteur de pondération dans le calcul de la recharge des bilans trimestriels	156
Équation 31 : Équation de Sobhani (1975) pour convertir CNII en CNI.....	159
Équation 32 : Équation de Hawkins et al. (1985) pour convertir CNII en CNIII	159
Équation 33 : Équation de conversion des valeurs de CNII en fonction de la pente de Sharpley & Williams (1990).....	159
Équation 34 : Quantification du ruissellement.....	159
Équation 35 : Relation de Jain et al. (2006)	159
Équation 36 : Calcul du potentiel de rétention maximal en eau	159
Équation 37 : Calcul des précipitations efficaces.....	160
Équation 38 : Calcul de la teneur en eau du sol	160
Équation 39 : Percolation journalière hors du sol (sans prise en compte des flux latéraux)	160
Équation 40 : Calcul du temps de transfert à travers le sol.....	161
Équation 41 : Calcul du temps de transfert horizontal	161

Équation 42 : Calcul du flux latéral dans la couche (sans prise en compte des flux verticaux).....	161
Équation 43 : Somme des équations des flux verticaux et latéraux.....	161
Équation 44 : Percolation journalière hors d'une couche	161
Équation 45 : Calcul du flux latéral dans la couche (avec prise en compte des flux verticaux).....	162
Équation 46 : Calcul du temps de transfert à l'aquifère	162
Équation 47 : Calcul des volumes d'eaux potentiellement récoltés annuellement par récupération des ruissellements	173
Équation 48 : Fonction de population du scénario 3.....	184
Équation 49 : Formule de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	197
Équation 50 : Formule du coefficient de détermination (R^2)	197
Équation 51 : Formule de l'erreur absolue moyenne (MAE).....	197
Équation 52 : Formule du coefficient d'efficience de Nash-sutcliffe (NSE)	198
Équation 53 : Formule du coefficient de Nash-sutcliffe normalisé (NNSE)	198
Équation 54 : Formule du pourcentage de biais (PBIAS)	198
Équation 55 : Formule de l'erreur résiduelle maximum (MaxE)	198
Équation 56 : Indicateur global utilisé pour l'évaluation des modèles climatiques, tiré de Ahmed et al. (2019)	199

Chapitre 1 : introduction : le projet IrriLux

1. Mise en contexte

En 2023, la valeur ajoutée brute (VAB) du secteur agricole luxembourgeois ne représentait que 0,3 % de la VAB totale, composée de 86 % et 14 % respectivement pour le secteur tertiaire et l'industrie. Le secteur agricole emploie 3800 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 était de 52,6 % ou 131 384 ha (Le gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg, 2016). Le Luxembourg compte 1970 exploitations agricoles, dont la moitié a une superficie supérieure à 50 ha. L'agriculture biologique représente six pourcents des surfaces et est pratiquée par 114 agriculteurs 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 surface agricole utilisée (SAU) a été observée, 6000 ha ont été perdu entre les années 1960 et 2019. Depuis ces années 1960, le secteur agricole luxembourgeois a été largement influencé par la politique agricole commune. Cette influence s'est traduite par (i) une concentration des exploitations agricoles (Hauptert, 2009; Casali & Hauptert, 2012; Allegrezza et al., 2013); (ii) une forte stabilisation de la répartition selon la spécialisation (Allegrezza et al., 2013); et (iii) le développement de zones réservées principalement à l'élevage (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 avec presque exclusivement 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 a été mis en place par le plan stratégique national (2023-2027) pour soutenir et encourager les producteurs de légumes et de fruits (MAVDR, 2022). De plus, le plan agricole contribuera également à porter à 20 % la superficie cultivée 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). Ces intentions sont reflétées par les données de l'Administration des services techniques de l'agriculture (ASTA). En effet, depuis 2015, la superficie cultivée en légume a presque été multipliée par cinq, passant de 70 à 330 ha.

En 2020, selon la base de données AQUASTAT (FAO, 2021), aucune surface cultivée n'est irriguée au Grand-Duché de Luxembourg. En réalité, les producteurs maraichers se sont récemment équipés de systèmes d'irrigation. On peut s'attendre à ce que les volumes d'eau destinés à l'irrigation continuent d'augmenter, compte tenu des hausses des hectares maraichers cultivés déjà observées et de celles anticipées pour l'avenir.

Dans le même temps, la croissance démographique du Grand-Duché de Luxembourg n'a fait qu'augmenter au cours des 20 dernières années, passant de 448.300 habitants en 2002 à 660.809 habitants en 2022 (STATEC/CITIE, 2023). De ce fait, la densité de population s'est également vue augmentée, passant de 173,3 habitants/km² en 2002 à 255,5 habitants/km² 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). Finalement, 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 m³/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.

Enfin, en ce qui concerne le changement climatique, le dernier rapport du GIEC a établi avec un niveau de confiance élevé que (i) 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 (ii) 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. En effet, la probabilité que le seuil de 1,5°C d'ici 2025-2029 soit atteint, s'élève à 70% selon l'OMM et le Met office britannique (RTBF, 2025). Finalement, 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.

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. Objectifs et échelles de travail

Compte tenu du contexte luxembourgeois, l'objectif principal du projet IrriLux est de : « **développer une approche intégrée de gestion des ressources en eau visant à confronter les besoins en eau horticole aux disponibilités afin d'améliorer leurs gestions** ». Trois sous objectifs ont été définis comme nécessaire à l'atteinte de cet objectif principal (Tableau 1).

Le premier objectif (OS1) consiste à mettre en place un outil d'aide à la décision à l'échelle nationale afin d'évaluer le potentiel d'irrigation. Pour ce faire, plusieurs activités sont prévues : la cartographie des parcelles agricoles concernées, l'évaluation de l'aptitude des terres pour l'horticulture irriguée, l'estimation des besoins en eau pour la campagne agricole et l'analyse des ressources en eau disponibles, qu'elles soient conventionnelles (eaux de surface et souterraines) ou non conventionnelles. Ces informations seront ensuite confrontées pour déterminer la balance entre besoins et ressources, puis intégrées dans un outil interactif accessible à l'échelle du pays.

Le deuxième objectif (OS2) vise à concevoir et mettre en place un outil d'aide à la décision adapté à l'échelle de la parcelle. Cet outil permettra de déterminer le moment optimal et la quantité d'eau adéquate à appliquer, favorisant ainsi une gestion durable de l'irrigation. Les actions prévues comprennent l'équipement des parcelles avec des capteurs de suivi de l'humidité du sol, l'observation des pratiques d'irrigation des producteurs, l'élaboration d'un bilan hydrique, et la mise en place d'un système d'alerte automatique. Les producteurs seront également impliqués à travers des échanges et retours pendant et après les campagnes agricoles.

Enfin, le troisième objectif (OS3) concerne la mise en place d'une modélisation hydrologique intégrant les usagers. Ce travail repose sur la récolte de données, la calibration du modèle hydrologique et la production de scénarios à l'échelle du bassin versant. L'approche vise à mieux comprendre et anticiper les dynamiques hydriques dans une logique de gestion et planification des ressources en eau ainsi qu'à arbitrer le partage des ressources entre les différents usagers.

3. Échelles de travail

Le projet suit deux échelles de travail (Figure 1) : locale et nationale. Les résultats obtenus à l'échelle locale serviront à alimenter 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. En ce qui concerne l'échelle locale, deux volets sont étudiés : d'une part l'appui aux agriculteurs via la mise en place d'outils de gestion de l'eau, et d'autre part la modélisation hydrologique d'un bassin versant.

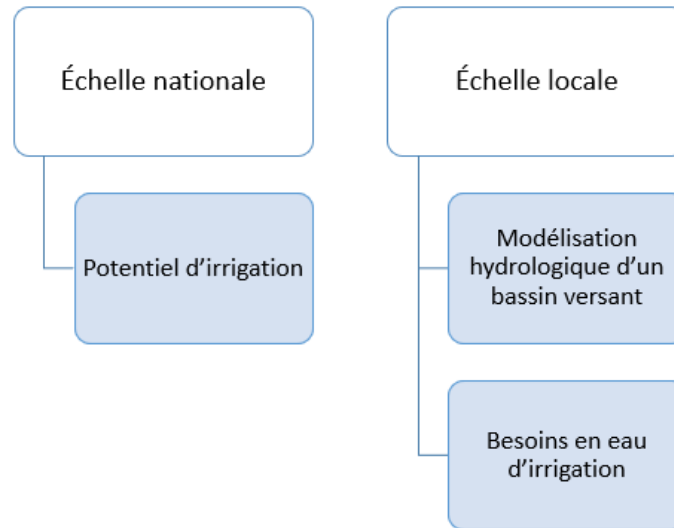


Figure 1 : Échelles de travail

4. Chronogramme

Les différentes activités sont réparties en 3 pôles d'activités (Figure 2) :

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

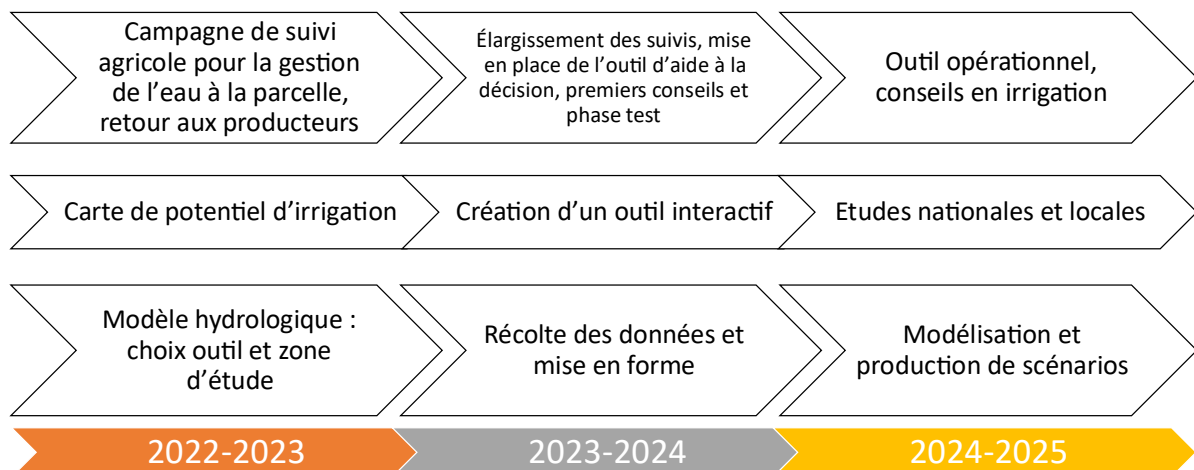


Figure 2 : Chronogramme général des activités

5. Rapports et documents

Les objectifs spécifiques présentés au Tableau 1, se divisent en trois rapports distincts. Chacun d'eux peut se lire séparément. La structure de ces documents est présentée ci-dessous. Concernant le présent chapitre de potentiel d'irrigation, les chapitres 1 et 2 présentent l'introduction, la méthodologie et les résultats de cette thématique. Les autres chapitres développent les méthodologies de calcul des données d'entrées nécessaires à la mise en place du potentiel d'irrigation dans un climat passé et futur.

- Rapport 1 : le potentiel d'irrigation à l'échelle nationale
 - Chapitre 1 : introduction générale
 - Chapitre 2 : le potentiel d'irrigation à l'échelle nationale
 - Chapitre 3 : spatialisation des variables climatiques
 - Chapitre 4 : l'aptitude des terres à recevoir une horticulture irriguée
 - Chapitre 5 : besoins en eau des cultures et d'irrigation
 - Chapitre 6 : méthodes de détermination des débits environnementaux et estimation des ressources en eau de surface
 - Chapitre 7 : estimation des ressources en eaux souterraines
 - Chapitre 8 : ressources en eau de récupération de ruissellement de surfaces imperméables
 - Chapitre 9 : prélèvements existants et scénarios de consommation
 - Chapitre 10 : sélection des modèles climatiques futurs
 - Chapitre 11 : besoins et ressources en eau futurs et potentiel d'irrigation futur
- Rapport 2 : mise en place d'un outil de suivi et d'aide à la prise de décision pour la gestion de l'eau à la parcelle
- Rapport 3 : gestion intégrée des ressources en eaux : approche par modélisation

« 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 . »

Tableau 1 : Objectifs spécifiques du projet IrriLux

Objectifs spécifiques	Activités	Échelle de travail	Délivrable
OS1 : Mise en place d'un outil d'aide à la décision nationale sur le potentiel d'irrigation	<ul style="list-style-type: none"> • Cartographier les parcelles agricoles concernées • Estimer l'aptitude des terres à recevoir une horticulture irriguée • Estimer les besoins en eau d'irrigation de la campagne agricole • Estimer les ressources en eau disponibles conventionnelles (eaux de surface et eaux souterraines) et non conventionnelles disponibles à l'irrigation horticole • Confronter les ressources en eaux disponibles à l'irrigation aux besoins en eau. • Intégrer les résultats dans un outil interactif 	Nationale	Rapport 1, le rapport ci-présent
OS2 : Concevoir et mettre en place un outil d'aide à la décision permettant de déterminer, à l'échelle de la parcelle, le moment optimal et la quantité adéquate d'eau d'irrigation, afin d'assurer une gestion durable.	<ul style="list-style-type: none"> • Équiper les parcelles agricoles : mise en place d'équipement pour le suivi de la teneur en eau du sol • Suivre les habitudes d'irrigation des producteurs • Mettre en place d'un bilan hydrique de la parcelle • Suivre et alerter automatiquement les producteurs concernant leur gestion de l'irrigation à partir des données enregistrées par les capteurs • Discuter et commenter l'utilisation et l'impact de l'outil d'aide à la décision avec les producteurs pendant et après la campagne de production 	Locale : parcelle	Rapport 2
OS3 : Mise en place d'une modélisation hydrologique avec usagers en vue d'affiner la compréhension de l'hydrologie d'un bassin versant et des impacts des usages anthropiques sur ce dernier	<ul style="list-style-type: none"> • Choisir le bassin modélisé • Choisir un outil de modélisation adapté • Récolter des données • Calibrer le modèle • Produire des scénarios 	Bassin versant	Rapport 3