



LE GOUVERNEMENT  
DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG  
Ministère de l'Environnement, du Climat  
et du Développement durable

Fonds pour la gestion de l'eau

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

**2<sup>eme</sup> Rapport Annuel**  
**Octobre 2024**



**Equipe de projet :**

Cédric Magain & Guillaume Renard ( <i>Equal contribution</i> )	
Aurore Degré	Jeroen Meersmans
Serge Brouyère	Philippe Orban
Caroline De Clerck	Joost Wellens (coordinateur)

**E-mails :**

Cedric.Magain@uliege.be	P.Orban@uliege.be
Guillaume.Renard@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, aboutis mais pas définitifs. Le présent document a comme vocation de présenter ce qui a été réalisé lors de la deuxième année du projet Irrilux »*

## Table des matières

1. IrriLux.....	1
1.1. Objectifs.....	1
1.2. Échelles de travail.....	1
2. Chronogramme.....	1
Chapitre 1 : Le potentiel d'irrigation .....	3
1. Carte d'adaptabilité des terres .....	4
1.1. Introduction .....	4
1.2. Matériel et méthodes.....	4
1.3. Résultats et discussion.....	25
1.4. Perspectives.....	26
2. Estimation des besoins en eau des cultures et d'irrigation.....	27
2.1. Introduction .....	27
2.2. Méthodologie .....	27
2.3. Résultats et discussion.....	30
2.4. Conclusion .....	34
3. Estimation des ressources en eaux souterraines .....	36
3.1. Introduction .....	36
3.2. Matériel .....	36
3.3. Méthodes .....	39
2.2. Résultats et discussion.....	45
2.3. Perspectives.....	47
4. Estimation des ressources en eaux de surfaces .....	49
4.1. Introduction .....	49
4.2. Cours d'eaux .....	49
4.3. Zones d'activités économiques.....	54
4.4. Stations d'épurations .....	57
4.5. Comparaisons aux besoins .....	59
4.6. Résumé et conclusions .....	60
Chapitre 2 : Méthodes de détermination des débits environnementaux.....	61
1. Contexte .....	61
2. Débits environnementaux (ou <i>eflows</i> ) .....	61
2.1. Méthodologies afin de définir des débits écologiques d'après la Directive-Cadre Européenne sur l'Eau.....	63

2.2.	Sustainability Boundary Approach (SBA).....	64
2.3.	Indicators of hydrological alteration.....	65
3.	Comparaison SBA et IHA/RVA .....	69
3.1.	Résultats et discussion SBA vs. IHA/RVA .....	71
3.2.	Conclusions sur la comparaison .....	76
4.	Intégration dans la planification du potentiel d'irrigation .....	76
4.1.	Méthodologie développée pour définir les volumes potentiellement prélevables dans les cours d'eau .....	77
4.2.	Co-construction de limites avec l'AGE .....	79
5.	Résumé, conclusions et recommandations.....	80
	Chapitre 3 : Interpolation des variables climatiques .....	81
1.	Introduction.....	81
1.1.	Importance de l'évapotranspiration dans la modélisation.....	81
1.2.	Constat des résultats de spatialisation pour l'année 2022-2023.....	81
2.	Matériel .....	85
2.1.	Stations météorologiques.....	85
2.2.	GIS.....	86
2.3.	Logiciels et packages.....	86
3.	Méthodes .....	86
3.1.	Nettoyage des données .....	86
3.2.	Méthodes d'interpolation .....	87
3.3.	Schéma méthodologique du code d'interpolation journalière .....	90
4.	Résultats et discussion .....	91
4.1.	Évapotranspiration .....	91
4.2.	Statistiques de sélection des modèles.....	93
4.3.	Erreurs quadratiques et biais moyens .....	94
4.4.	Erreurs par stations .....	95
5.	Conclusion .....	96
	Chapitre 4 : Sélection des modèles climatiques.....	97
1.	Introduction.....	97
2.	Matériels et méthodes .....	97
2.1.	Modèles .....	98
2.2.	Expériences climatiques .....	101
2.3.	Données climatiques .....	103
2.4.	Téléchargement des modèles.....	105
2.5.	Traitement des données de modèles .....	106

2.6. Sélection des modèles .....	106
3. Résultats .....	110
3.1. Téléchargement des modèles .....	110
3.2. Sélection pratique .....	111
3.3. Évaluation des modèles .....	111
4. Conclusion .....	112
<b>Chapitre 5 : État des ressources en eaux et de leur consommation .....</b>	<b>116</b>
1. Introduction .....	116
2. Matériel et méthodes .....	116
2.1. Données disponibles .....	116
2.2. Réseau d'usagers actuel .....	116
2.3. Allocation des ressources en eaux par secteur .....	119
3. Scénarios futurs .....	120
3.1. Eau potable .....	120
3.2. Eau agricole .....	120
3.3. Eau industrielle .....	120
3.4. Règles d'allocation .....	121
4. Proposition de bassins versant .....	122
5. Outils de modélisation .....	122
<b>Chapitre 6 : Terrain .....</b>	<b>124</b>
1. Introduction .....	124
2. Installation .....	124
2.1. Installation chez les producteurs .....	126
2.2. Problèmes rencontrés .....	126
3. Alertes d'irrigation .....	127
3.1. Bilan du stock d'eau du sol .....	127
3.2. ZentraCloud .....	129
3.3. Mail .....	130
3.4. Interaction via WhatsApp .....	132
4. Apprentissage partagé : réunion avec les producteurs .....	132
5. Perspectives .....	133
<b>Chapitre 7 : Communication .....</b>	<b>134</b>
1. Le projet IrriLux .....	134
1.1. Gestion de l'irrigation à la parcelle .....	135
1.2. Présentation du potentiel d'irrigation .....	138
2. Retours du terrain : partie irrigation .....	144

2.1.	Formation continue en horticulture : Mode d'emploi pour une irrigation raisonnée.....	144
2.2.	Journées portes ouvertes : LTA.....	144
Bibliographie.....		147
Annexes .....		156
Chapitre 3 : Spatialisation de l' $ET_0$ .....		156

## Table des figures

Figure 1 : Échelles de travail .....	2
Figure 2 : Chronogramme général des activités .....	2
Figure 3 : Organigramme pour la mise en place de la carte de potentiel d'irrigation.....	4
Figure 4 : Classification de l'eau totale disponible du sol, carte de l'eau totale disponible du sol (mm) à gauche et des classes d'adaptabilité à droite .....	6
Figure 5 : Classification de la profondeur de sol, à gauche carte des profondeurs de sols (cm) et à droite, carte des classes d'adaptabilités de la profondeur de sol .....	8
Figure 6 : Triangle de texture selon la classification USDA.....	9
Figure 7 : Classification de la texturer de sol, à gauche carte des classes de texture de sols USDA et à droite, carte des classes d'adaptabilités de la texture de sol .....	10
Figure 8 : Classification du pourcentage de carbone organique, à gauche la carte du pourcentage de carbone et à droite, la carte des classes d'adaptabilités du carbone.....	11
Figure 9 : Classification du drainage du sol, à gauche la carte de drainage des sols et à droite, la carte des classes d'adaptabilités du drainage du sol.....	12
Figure 10 : Classification de la pente, à gauche carte des pentes et à droite, la carte des classes d'adaptabilités de la pente .....	13
Figure 11 : 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'adaptabilités de la distance au cours d'eau.....	14
Figure 12 : STEP prioritaires pour la mise en place d'un traitement quaternaire (gauche), classes de distances aux STEP prioritaires (droite).....	15
Figure 13 : Classification de la distance aux aquifères, à gauche la carte des aquifères présentés, à droite la carte des classes d'adaptabilités pour la distance à l'aquifère du Bundsandstein .....	16
Figure 14 : Zones d'activités économiques et classes de distances associées .....	17
Figure 15 : Zones de protection de la nature (gauche) et classes de distances associées (droite) .....	18
Figure 16 : 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'adaptabilités pour le prix de l'eau .....	19
Figure 17 : Classification de la densité démographique, à gauche la carte de la densité démographique par commune (hab./km <sup>2</sup> ) et à droite, la carte des classes d'adaptabilités de la densité démographiques.....	20
Figure 18 : Classification de la disponibilité de la donnée, à gauche la carte de la disponibilité de la donnée bassin versant et à droite, la carte des classes d'adaptabilités de la disponibilité de la donnée .....	21
Figure 19 : Matrice de comparaison fictive, avec le symbole de la plante qui représente les propriétés de sols nécessaires à soutenir une production agricole, la goutte d'eau qui représente la proximité aux ressources en eau et finalement, le symbole de paysage qui comprend notamment la pente .....	23
Figure 20 : Processus itératif de la mise en place de la matrice de comparaison .....	24
Figure 21 : Excel transmis aux experts luxembourgeois pour la proposition de nouveaux facteurs de comparaison et de leurs classes .....	25
Figure 22 : Excel transmis aux experts luxembourgeois pour la comparaison des facteurs, mise en place de la matrice de comparaison.....	25
Figure 23 : Carte des terres adaptées à soutenir une agriculture irriguée (LandSuitability). A gauche, valeurs sur le territoire luxembourgeois, à droite seul les zones recensées dans le parcellaire agricole sont considérées.....	26
Figure 24 : Exemple, probabilité d'occurrence pour des précipitations, tiré de (Raes, 2013) .....	28

Figure 25 : Schéma méthodologique pour la gestion des besoins en eau d'irrigation à la parcelle, tirée du rapport annuel 2022-2023 .....	29
Figure 26 : Schéma méthodologique pour la gestion des besoins en eau d'irrigation à la parcelle, année 2023-2024.....	29
Figure 27 : Besoin en eau des cultures pour le plateau de Contern (période 2030-2049), pour une culture fictive couvrant l'ensemble de l'année.....	33
Figure 28 : Besoin en eau des cultures pour le plateau de Contern (période 2060-2079), pour une culture fictive couvrant l'ensemble de l'année.....	33
Figure 29 : Besoin en eau des cultures pour le plateau de Contern (période 2030-2049), selon le scénario de production S1.....	33
Figure 30 : Besoin en eau des cultures pour le plateau de Contern (période 2060-2079), selon le scénario de production S1.....	33
Figure 31 : Besoin en eau d'irrigation estimé à l'aide d'AquaCrop.....	35
Figure 32 : Besoin en eau d'irrigation à la parcelle pour des tomates plantées en mai, campagne 2019 .....	35
Figure 33 : Besoin en eau d'irrigation maraîcher pour la période de production, 2019, « worst case » scenario .....	35
Figure 34 : Groupes hydrologiques et réserve utile des sols luxembourgeois .....	37
Figure 35 : Aquifères exploitables pour l'agriculture d'après l'AGE et bassins versants testés pour calculer le débit de base (à gauche) et classes d'utilisation du sol reclassifiées pour la méthode SCS-CN (à droite) .....	39
Figure 36 : Bilan de Thornthwaite couplé à la méthode SCS-CN pour l'estimation du ruissellement de surface .....	41
Figure 37 : Cartes des Curve Numbers I, II et III ajustés par la pente.....	45
Figure 38 : Valeurs de recharge moyenne annuelle sur la période 2010-2020.....	46
Figure 39 : Débits et Base flows calculés aux stations de Kautenbach et Hunnebuer .....	47
Figure 40 : Calcul de l'eau souterraine disponible pour l'irrigation.....	48
Figure 41 : Typologie des principaux cours d'eaux ; Les rivières sont indiquées en gras .....	49
Figure 42 : Bassins versants associés aux limnimètres; typologie des cours d'eaux.....	50
Figure 43 : Volumes d'eaux cumulés pour différentes hypothèses de prélèvements d'eaux. Prod correspond à des prises d'eau entre mai à aout 2019 et off à des prises allant de novembre 2018 à mars 2019.....	53
Figure 44 : Bassins versants de la Moselle et de la Sarre, tiré de <a href="http://www.iksms-cipms.org/servlet/is/20129/">http://www.iksms-cipms.org/servlet/is/20129/</a> .....	54
Figure 45 : Zones d'activités économiques (ZAE) existantes et projetées (gauche) ; Volumes potentiels (droite).....	55
Figure 46 : STEP et STEP prioritaires pour traitement quaternaire avec illustration de leur capacité (EH) .....	58
Figure 47 : 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) .....	62
Figure 48 : Illustration de la « Sustainability Boundary Approach » (SBA) afin de définir des buts de gestion de l'eau durable, repris de Richter et al. (2010) .....	65
Figure 49 : 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) .....	68
Figure 50 : Composantes des débits environnementaux. Tiré de Mathews et Richter (2007) .....	69
Figure 51 : Bassins versants associés aux stations limnimétriques considérées pour la comparaison .	70

Figure 52 : Débits moyens mensuels pour les trois simulations considérés et limites RVA de $\pm 1$ écart-type. 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 .....	72
Figure 53 : 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), Merter (milieu) et Hunnebuer (bas).....	73
Figure 54 : Débits mensuels moyens et limites RVA de $\pm 1$ ET (gauche) ; débits mensuels médians et limites RVA de $\pm 17$ percentiles (droite) ; station d'Hunnebuer .....	74
Figure 55 : Altérations hydrologiques pour une prise de 20% des débits simulées à la station d'Hunnebuer. Limites RVA fixées à $\pm 1$ écart-type de la moyenne (haut) et $\pm 17$ percentiles de la médiane (bas).....	75
Figure 56 : 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. ....	77
Figure 57 : Volumes d'eaux cumulés pour différentes hypothèses de prélèvements d'eaux. Prod correspond à des prises d'eau entre mai à aout 2019 et off à des prises allant de novembre 2018 à mars 2019.....	78
Figure 58 : Illustration du framework ELOHA, tiré de Poff et al. (2010) .....	79
Figure 59 : Relations entre métrique de biodiversité de macroinvertébrés et métrique de débits, tiré de Hough et al. (2022) .....	80
Figure 60 : Carte de la spatialisation de l'ET <sub>0</sub> pour la période de 2010 à 2020, set de variables complet désigne l'estimations de l'ET <sub>0</sub> à partir de l'ensemble des données climatiques disponibles et l'utilisation de proxys, Tmax et Tmin, représente l'estimation de l'ET <sub>0</sub> à partir uniquement des variables de températures et l'utilisation de proxys, tirée du rapport annuel IrriLux 2022-2023 .....	83
Figure 61 : Localisations des stations météorologiques intégrées dans la base de données pour la spatialisation et l'estimation de l'ET <sub>0</sub> .....	85
Figure 62 : Disponibilités des stations météorologiques pour l'ensemble de la base de données pour chacune des variables climatiques. P = précipitations, RH = humidité relative de l'air, RS = radiation solaire, Tmax = température maximale de l'air, Tmin = température minimale de l'air, WS = vitesse de vent.....	86
Figure 63 : Illustration de l'interpolation NatN avec les poids de Sibson. L'air des cercles verts sont les poids d'interpolation. Le polygone mauve est la cellule de Voronoi associée au point d'interpolation introduit.....	88
Figure 64 : Illustration de l'appariement d'une localisation avec les autres .....	89
Figure 65 : Example d'un semi-variogramme avec les composantes illustrées. Tiré de Biswas et al., (2013) .....	89
Figure 66 : Workflow des interpolations journalières .....	91
Figure 67 : Valeurs d'ET <sub>0</sub> spatialisée pour une journée (24-02-2018) .....	92
Figure 68 : Valeur d'ET <sub>0</sub> cumulée moyenne (2010-2020) pour la période de production horticole (mai à septembre) .....	92
Figure 69 : Valeur d'ET <sub>0</sub> cumulée moyenne (2010-2020) annuelle .....	92
Figure 70 : Valeurs de précipitations journalières spatialisées pour une journée (10-04-2018).....	93
Figure 71 : Méthodes d'interpolation sélectionnées par variable climatique, avec TMAX : la température de l'air journalière maximum, TMIN : la température de l'air journalière minimum, SUMGS : la radiation solaire ; WV200 : la vitesse du vent à 2m ; RH200 : l'humidité relative de l'air à 2m et P : les précipitations .....	94
Figure 72 : Cartes des biais moyens par stations pour les différentes variables climatiques, avec TMAX : la température de l'air journalière maximum, TMIN : la température de l'air journalière	

minimum, RS : la radiation solaire ; WS : la vitesse du vent à 2m, RH : l'humidité relative de l'air à 2m et P : les précipitations .....	95
Figure 73 : Cartes des RMSE par stations pour les différentes variables climatiques , avec TMAX : la température de l'air journalière maximum, TMIN : la température de l'air journalière minimum, RS : la radiation solaire ; WS : la vitesse du vent à 2m, RH : l'humidité relative de l'air à 2m et P : les précipitations.....	96
Figure 74 : Les modèles régionaux CORDEX contraints par les modèles globaux du CMIP5 .....	99
Figure 75 : Structure des éléments constituant la base de données CORDEX .....	100
Figure 76 : Base de données disponibles sur le Climate Data Store (CDS).....	101
Figure 77 : Les défis socio-économiques proposés par les expériences CMIP6 (tiré de O'Neil et al., 2014).....	102
Figure 78 : Pixels des modèles climatiques à considérer pour le Grand-Duché de Luxembourg lors de l'utilisation de modèles climatiques globaux issus du CMIP6 .....	105
Figure 79 : Pixels de modèles climatiques considérés pour le Grand-Duché de Luxembourg lors de l'utilisation de modèles climatiques régionaux CORDEX.....	105
Figure 80 : Méthodologie pour la sélection des variables climatiques issues des modèles disponibles pour le projet CORDEX, plateforme Copernicus.....	106
Figure 81 : Modèles climatiques régionaux disponibles pour l'évaluation. Ces modèles possèdent les variables requises à la mise en place de l'estimation de l'ETO et de précipitations .....	113
Figure 82 : Graphiques des modèles climatiques pour les variables de précipitation, d'évapotranspiration, de température maximum et minimum pour 4 scénarios climatiques, RCP85 : réchauffement planétaire avec un forçage radiatif à 8.5 W/m <sup>2</sup> ; RCP45 à 4,5 ; RCP26 à 2.6; historical : les données historiques des modèles climatiques sélection.....	115
Figure 83 : Bassins versants associés aux limnimètres et typologie des cours d'eaux .....	117
Figure 84 : Bassins versants avec autorisations de prélèvement (par catégorie).....	118
Figure 85 : Fourniture journalière en eau potable du SEBES. Tiré du 1 <sup>er</sup> rapport annuel. ....	119
Figure 86 : Bassins versants situé sur le territoire luxembourgeois .....	122
Figure 87 : Répartition spatiale des parcelles suivies lors de la deuxième année.....	124
Figure 88 : Renforcement de l'attache des piles afin d'éviter des coupures techniques dues à un manque de courant .....	126
Figure 89 : Installation dans une serre de tomates .....	127
Figure 90 : Installation dans une parcelle de choux au Lycée Technique Agricole .....	127
Figure 91 : Installation sur une parcelle de salade .....	127
Figure 92 : Installation sur une parcelle de gazon .....	127
Figure 93 : Théorie sur le stock d'eau du sol, tiré de (Allen et al., 1998) .....	128
Figure 94 : Données de teneur en eau du sol disponibles sur le ZentraCloud, figure issue du rapport annuel 2022-2023 .....	129
Figure 95 : Exemple de graphique personnalisé pour une parcelle de chou disponible sur le ZentraCloud, en rouge la zone de stress, valeurs inférieures à la RFU et en bleu, zone de sur-irrigation, valeurs supérieures à la valeur de capacité au champ .....	130
Figure 96 : Légende des graphiques de bilan du stock d'eau de la parcelle.....	130
Figure 97 : Graphiques transmis journalièrement et automatiquement aux producteurs appuyés ..	131
Figure 98 : Sol imperméabilisé, faible infiltration.....	132
Figure 99 : Bilan hydrique du sol, couplées aux variables climatiques observées et estimées à la station de Findel (MeteoLux) .....	133
Figure 100 : Schéma général du projet Irrilux.....	134
Figure 101 : Photographies de sorties de terrain : mise en place de capteurs et échantillonnage et analyses de sols .....	135

Figure 102 : Photographie d'un atelier avec les producteurs suivi et illustration d'une campagne agricole irriguée.....	136
Figure 103 : Capture d'écran de la plateforme de suivi de l'humidité de sol Zentra Cloud. ....	136
Figure 104 : Fiche explicative destinée aux producteurs et affichée sur les boîtiers des capteurs. ....	137
Figure 105 : Intégration du monitoring de l'humidité dans une modélisation de la productivité des cultures en fonction de l'eau.....	137
Figure 106 : Schéma général du potentiel d'irrigation .....	138
Figure 107 : Stations météorologiques et schéma du code d'interpolation des variables climatiques. ....	138
Figure 108 : Spatialisation de l' $ET_0$ : année 1 et année 2 avec échelles commune .....	139
Figure 109 : Spatialisation de l' $ET_0$ : année 1 et année 2 avec échelles ajustées à chacune des cartes .....	139
Figure 110 : Schéma de la méthodologie de recharge (SCS-CN & Thornthwaite).....	140
Figure 111 : Importance écologique des composantes de débit et méthodes hydrologiques recensées dans la DCE .....	140
Figure 112 : Comparaison des méthodes SBA et IHA.....	141
Figure 113 : Comparaison IHA et SBA : détail sur deux indicateurs d'altérations hydrologique .....	141
Figure 114 : Processus itératif de construction et validation de la cohérence de matrices .....	142
Figure 115 : Exemple de matrice de comparaison par paires .....	142
Figure 116 : Résultat cartographique de l'exemple de matrice de comparaison par paires. A gauche, une matrice avec les poids proposés par l'équipe IrriLux et à droite avec le facteur d'importance de distance aux STEP fixé à 0,2.....	143
Figure 117 : Schéma du potentiel d'irrigation avec mise en évidence des éléments pouvant être rendus dynamiques .....	143
Figure 118 : Invitation à la formation continue en horticulture réalisée par les services de l'horticulture de l'ASTA transmise eux producteurs .....	145
Figure 119 : Un des posters présentés lors de la formation sur la gestion de l'eau à la parcelle et l'irrigation .....	145
Figure 120 : Formation continue en horticulture, mode d'emploi pour une irrigation raisonnée.....	145
Figure 121 : Invitation officielle à la journée portes ouvertes au Lycée Technique Agricole .....	146
Figure 122 :Poster présenté lors de la journée portes ouvertes au Lycée Technique Agricole .....	146
Figure 123 : Stand ULiège - IrriLux lors de la journée portes ouvertes au Lycée Technique Agricole .	146
Figure 124 : Présentation du projet IrriLux lors de la journées portes ouvertes au Lycée Technique Agricole.....	146

## Table des Tableaux

Tableau 1 : Facteurs considérés pour la matrice de comparaison .....	5
Tableau 2 : Classification de la profondeur de sol pour le projet IrriLux basée sur les classes de cultures maraîchères proposées par Sys et al. (1993).....	7
Tableau 3 : Importance des différentes classes USDA sur le sol luxembourgeois.....	9
Tableau 4 : Classes d'adaptabilité pour la texture de sols dans le cadre du projet IrriLux, basées sur la littérature.....	10
Tableau 5 : Typologie des cours d'eaux luxembourgeois.....	13
Tableau 6 : Classes d'adaptabilité pour les critères classifiés.....	21
Tableau 7 : Intensité de l'importance d'un critère par rapport à l'autre (traduit et adapté de Gonfa et al., 2021).....	23
Tableau 8 : Matrice de comparaison basée sur les propriétés de sols comme facteurs aux poids les plus élevés ; Avec TS : Texture du Sol, PS : Profondeur du Sol, CO : Carbone Organique, Dr : le Drainage, RU : la Réserve Utile du sol, P : la Pente, PRE : la Proximité à la Ressource en Eau, PE : le Prix de l'Eau, De : la Densité démographique, PZP : la Proximité d'une zone de Protection, DD : la quantité de Données Manquantes .....	25
Tableau 9 : Scénario de production typique pour le plateau de Contern .....	31
Tableau 10 : Durée de production de différentes cultures rencontrées sur le plateau de Contern.....	31
Tableau 11 : Correspondance classes LU LIS et SCS-CN.....	40
Tableau 12 : Correspondance entre groupe hydrologique, classe d'occupation du sol et valeur de CN. Les chiffres entre crochets correspondent à l'encodage des valeurs sous format raster.....	42
Tableau 13 : Limites de précipitations pour les classes de conditions antérieures d'humidité .....	42
Tableau 14 : Paramètres utilisés dans la séparation d'hydrographes pour les stations étudiées .....	47
Tableau 15 : Typologie des cours d'eaux au Grand-Duché de Luxembourg .....	49
Tableau 16 : Liste des stations limnimétriques utilisées .....	50
Tableau 17 : Règles de simulations de débit prélevé .....	51
Tableau 18 : Valeurs de débits d'étiage moyen (MNQ), de débits de hautes eaux (MHQ), et nombre de jours avec interdiction de prélèvement selon les limites MNQ pour la saison de production (prod) et hors-saison (off).....	52
Tableau 19 : ZAE actuelles, précipitations et évapotranspiration cumulées, volumes prélevables calculés .....	56
Tableau 20 : Zones d'activités économiques planifiées, aires et aire potentiellement imperméables associées (en ha) .....	57
Tableau 21 : Évaluation des différentes ressources disponibles (en m <sup>3</sup> ) et comparaison aux besoins.	59
Tableau 22 : Catégories de méthodologies pour la détermination de débits environnementaux, tiré de DCE Guidance n°31 (European Comission, 2015).....	64
Tableau 23 : Résumé des normes de débits environnementaux définis dans les cas d'études considérés. Repris de Richter et al., (2012) .....	65
Tableau 24 : Groupes de paramètres et indicateurs associés. Repris de Richter et al. (1996).....	66
Tableau 25 : Cours d'eaux étudiés et typologie, station limnimétriques et période de données associées.....	70
Tableau 26 : Méthodologie proposée pour définir les volumes potentiellement prélevables dans les cours d'eau .....	77
Tableau 27 : Données manquantes exprimées en % pour les différentes variables nécessaires à la mise en place de l' $ET_0$ selon la méthodologie proposée par la FAO dans son manuel 56 pour l'ensemble des stations pour lesquelles il est possible d'estimer $ET_0$ et des périodes disponibles transmises par l'ASTA, tiré du rapport annuel IrriLux 2022-2023.....	83

Tableau 28 : 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, tiré du rapport annuel IrriLux 2022-2023 .....	84
Tableau 29 : RMSE et Biais moyens des différentes variables climatiques pour le pays, avec TMAX : la température de l'air journalière maximum, TMIN : la température de l'air journalière minimum, RS : la radiation solaire ; WS : la vitesse du vent à 2m, RH : l'humidité relative de l'air à 2m et P : les précipitations.....	95
Tableau 30 : Scénarios climatiques disponibles sur le CDS .....	102
Tableau 31 : Extrait des données observées pour la variable de température maximale .....	104
Tableau 32 : Disponibilités des variables climatiques pour l'ensemble des scénarii .....	104
Tableau 33 : Modèles MCG et MCR disponibles pour le domaine EURO-11.....	105
Tableau 34 : Extrait de combinaisons testées pour l'évaluation des MCR européens, variable climatique de vitesse de vent .....	110
Tableau 35 : Modèles climatiques régionaux européens conservés, variables pour l'estimation de l'ET <sub>0</sub> et les précipitations disponibles .....	111
Tableau 36 : Sélection des combinaisons MCR-GCM pour le téléchargement des variables climatiques historiques et futures, basé sur (Copernicus Climate Change Service, 2024a).....	112
Tableau 37 : Score total pour les différentes variables des modèles climatiques futurs .....	114
Tableau 38 : Score total (somme de précipitation, ETO, Tmax et Tmin) pour les différents modèles climatiques testés.....	114
Tableau 39 : Les x meilleurs modèles sélectionnés, ici les modèles avec un RM supérieur à 0.5.....	114
Tableau 40 : Stations limnimétriques et cours d'eaux associés.....	117
Tableau 41 : Somme des prélèvements en eau potable entre 2019 et 2021 par secteur et par commune. Tiré du 1 <sup>er</sup> rapport annuel. ....	117
Tableau 42 : Somme des prélèvements en eau potable entre 2019 et 2021 par aquifère. Tiré du 1 <sup>er</sup> rapport annuel.....	118
Tableau 43 : Débits totaux autorisés (m <sup>3</sup> /s) par secteur .....	118
Tableau 44 : Résumé des hypothèses de calcul pour l'extrapolation des besoins en eau futur des différents secteurs .....	121
Tableau 45 : Parcelles suivies lors de la deuxième année du projet IrriLux .....	125
Tableau 46 : RMSE moyen par station et variable climatique .....	156
Tableau 47 : Biais par station et variable climatique .....	157

## Table des équations

Équation 1 : Estimation de l'eau totale disponible du sol .....	6
Équation 2 : Pourcentage de limon par horizon .....	8
Équation 3 : Moyenne pondérée sur le profil de sol, exemple du limon .....	8
Équation 4 : Attribution du poids des facteurs, exemple de la texture de sol.....	22
Équation 5 : Formule pour la mise en place de la carte d'adaptabilité des terres .....	22
Équation 6 : Calcul de l'index de consistance .....	23
Équation 7 : Calcul de ratio de cohérence .....	24
Équation 8 : Estimation de la probabilité d'occurrence selon Weibull, 1939 .....	27
Équation 9 : Facteur de pondération dans le calcul de la recharge des bilans trimestriels .....	40
Équation 10 : Équation de Sobhani (1975) pour convertir CNII en CNI .....	42
Équation 11 : Équation de Hawkins et al. (1985) pour convertir CNII en CNIII .....	43
Équation 12 : Equation de conversion des valeurs de CNII en fonction de la pente de Sharpley & Williams (1990).....	43
Équation 13 : Quantification du ruissellement.....	43
Équation 14 : Relation de Jain et al. (2006) .....	43
Équation 15 : Calcul du potentiel de rétention maximal en eau.....	43
Équation 16 : Forme générale du filtre digital récursif d'Eckhardt.....	44
Équation 17 : Calcul du baseflow index.....	44
Équation 18 : Calculs des volumes d'eaux annuels potentiellement récoltables.....	55
Équation 19 : Calcul de l'altération hydrologique.....	67
Équation 20 : Calcul du score Z.....	87
Équation 21 : Calcul des poids attribués dans une interpolation IDW .....	87
Équation 22 : Poids de Sibson.....	88
Équation 23 : Fonction d'énergie de l'interpolation TPS à deux dimensions .....	88
Équation 24 : Semi-variogramme empirique.....	89
Équation 25 : Krigeage ordinaire .....	90
Équation 26 : Krigeage universel, aussi appelé krigeage avec dérive externe .....	90
Équation 27 : Métrique composite de sélection des modèles. ....	91
Équation 28 : formule de l'erreur quadratique moyenne (RMSE).....	107
Équation 29 : Formule du coefficient de détermination ( $R^2$ ) .....	108
Équation 30 : Formule de l'erreur absolue moyenne (MAE).....	108
Équation 31 : Formule du coefficient d'efficience de Nash-sutcliffe (NSE) .....	108
Équation 32 : Formule du coefficient de Nash-sutcliffe normalisé (NNSE) .....	108
Équation 33 : Formule du pourcentage de biais (PBIAS) .....	109
Équation 34 : Formule de l'erreur résiduelle maximum (MaxE) .....	109
Équation 35 : Indicateur global utilisé pour l'évaluation des modèles climatiques, tiré de Ahmed et al., (2019) .....	109
Équation 36 : Calcul de la consommation journalière moyenne par habitant.....	120
Équation 37 : Réserve utile du sol .....	128
Équation 38 : Réserve facilement utilisable .....	129

# Introduction : le projet IrriLux, année 2

## 1. IrriLux

C'est dans un 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. Le contexte général plus détaillé de l'étude est disponible au Chapitre 1 du rapport annuel 2022-2023. Les objectifs et les échelles de travail présentés lors de l'année 2 du projet sont repris dans les sections qui suivent.

### 1.1. Objectifs

Compte tenu du contexte luxembourgeois, l'objectif du projet IrriLux est de cartographier 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. La méthodologie pour élaborer la carte du potentiel d'irrigation est développée au chapitre 1.

Afin d'atteindre ces objectifs, plusieurs méthodologies ont été développées et activités réalisées. Ce document constitue ainsi le rapport annuel pour l'année 2023-2024, deuxième année de réalisation du projet. Le chronogramme des différentes activités et échéances des objectifs sont développés dans la section 2. Ce document est construit en différents chapitres pouvant se lire indépendamment.

### 1.2. Échelles de travail

Comme le montre la Figure 1, le projet suit deux échelles de travail : 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. Une méthode a été développée durant l'année 1 du projet. Les modifications et nouveautés réalisées lors de cette année sont détaillées au chapitre 1. Certaines méthodologies employées afin de créer la carte de potentiel d'irrigation font, à des fins de clarté, l'objet de chapitres à part. Ainsi, les méthodes de détermination des débits environnementaux (cf. Chapitre 2), la spatialisation des variables climatiques (cf. Chapitre 3) et la sélection de modèles climatiques (cf. Chapitre 4) font l'objet de chapitres à parts entières.

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 (cf. Chapitre 6), et d'autre part la modélisation hydrologique d'un bassin versant (cf. Chapitre 5).

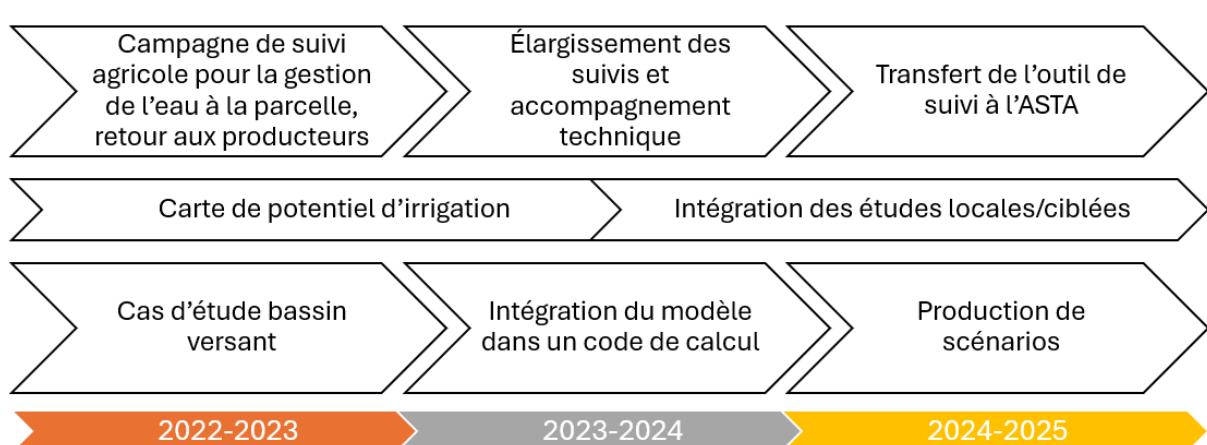
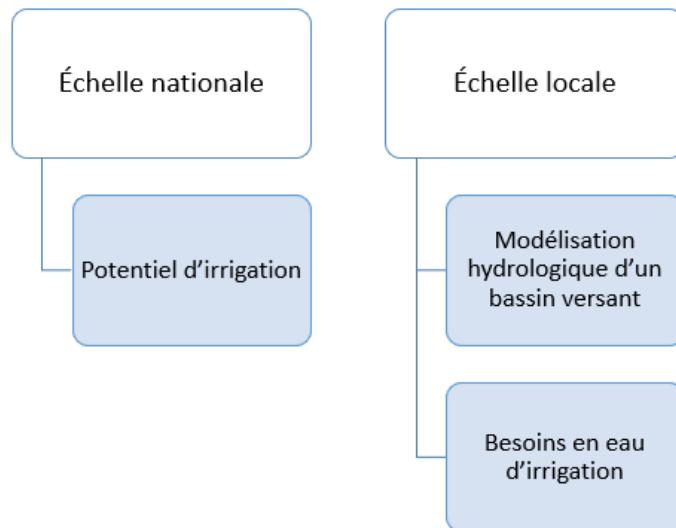
## 2. Chronogramme

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 cette seconde année, des progressions sur le potentiel d'irrigation ont été réalisées. En effet, pour la partie ressources en eau, les possibilités d'utilisation d'eau de surfaces ont été explorées via la mise en place de normes de débits environnementaux (cf. Chapitre 1 et 2), les méthodes de quantification des ressources en eaux souterraines et non-conventionnelles ont également été explorées (cf. Chapitre 1 et 5). De plus, concernant les besoins en eaux d'irrigation, ceux-ci peuvent

être déterminés pour le présent et le futur pour différentes échelles spatiales (cf. Chapitre 1). L'aptitude des terres à soutenir une agriculture irriguée a été déterminée à travers la construction d'une matrice de comparaison par paires (cf. Chapitre 1). Au niveau local, des clarifications et ajustements ont été décidés pour la modélisation du bassin versant. Finalement, le suivi au niveau de la parcelle a continué avec la mise en place de conseils en irrigation et l'extension du nombre de producteurs suivis (cf. Chapitre 6). Cette année a également été une année importante en termes de communication (cf. Chapitre 7)



**« 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) . »**