

ÉTUDE DE L'EFFET DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE POTENTIEL DE DEVELOPPEMENT DES PRODUCTIONS VÉGÉTALES EN RUSSIE, UKRAINE, KAZAKHSTAN A MOYEN TERME



RAPPORT FINAL

Juin 2016

Cette étude a été financée par le programme ministériel d'études (programme 215) du Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, FranceAgriMer et Intercéréales

Ce rapport relève de la responsabilité de ses auteurs et ne saurait en aucun cas constituer le point de vue des financeurs



BRL ingénierie

**1105 Av Pierre Mendès-France BP 94001
30001 NIMES CEDEX 5**

Date de création du document	Septembre 2015
Contact	Sébastien Chazot – Dominique Olivier

Titre du document	Étude de l'effet du changement climatique sur le potentiel de développement des productions végétales en Russie, Ukraine, Kazakhstan à moyen terme
Référence du document :	800814_Etude_CC_RUK_V3
Indice :	V3.0

Date émission	Indice	Observation	Dressé par	Vérifié et Validé par
9 octobre 2015	01	Rapport provisoire	Dominique Olivier ; Martial Bernoux ; Mathilde Chauveau ; Camille Lucas ; Sébastien Chazot	Sébastien Chazot
15 janvier 2016	02	Rapport final	Dominique Olivier ; Martial Bernoux ; Mathilde Chauveau ; Camille Lucas ; Sébastien Chazot	Sébastien Chazot
31 mai 2016	03	Rapport final corrigé	Dominique Olivier ; Martial Bernoux ; Mathilde Chauveau ; Camille Lucas ; Sébastien Chazot	Sébastien Chazot

ÉTUDE DE L'EFFET DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE POTENTIEL DE DÉVELOPPEMENT DES PRODUCTIONS VÉGÉTALES EN RUSSIE, UKRAINE, KAZAKHSTAN À MOYEN TERME

Rapport Final

PRÉAMBULE.....1

1. L'IMPORTANCE DES CULTURES DE BLÉ, MAÏS ET TOURNESOL EN RUSSIE, UKRAINE ET KAZAKHSTAN.....1

1.1 Trois pays fortement agricoles	1
1.2 Des conséquences défavorables à l'agriculture suite au démantèlement de l'ex-URSS, des opportunités aujourd'hui	2
1.3 Des surfaces en blé considérables	3
1.4 Un très fort développement de la culture du maïs, principalement en Russie et Ukraine	5
1.5 Des rendements en-dessous du potentiel de production	7
1.6 Une place majeure dans le marché mondial des céréales	8
1.7 Des surfaces en tournesol en forte progression	9
1.8 Une actualité géopolitique récente qui peut avoir des conséquences importantes pour l'agriculture ukrainienne	12

2. CADRAGE MÉTHODOLOGIQUE.....13

2.1 Principe général	13
2.2 Principales hypothèses	14
2.2.1 Trois cultures	14
2.2.2 Découpage en zones géographiques : 12 zones, 8 seront étudiées	14
2.2.3 Quatre grands types de sol	17
2.2.4 Deux scénarios de changement climatique contrastés	21

2.3 Deux grandes familles de simulations ont été conduites dans le cadre de l'étude.....23

2.3.1 Famille de simulations 1 : approche systématique des évolutions possibles des rendements sur la zone RUK <u>sous la seule hypothèse d'une évolution thermique</u>	23
2.3.2 Famille de simulations 2 : approche visant à cerner la <u>sensibilité du rendement à la température ET aux précipitations</u>	25

3. EVOLUTIONS POSSIBLES DES RENDEMENTS ET DE LA PRODUCTION SUR LA ZONE RUK SOUS L'INFLUENCE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES	27
3.1 Quels est l'impact possible du réchauffement climatique sur les rendements des cultures (blé, maïs, tournesol) de la zone RUK ?	27
3.1.1 Impact sur le blé	27
3.1.2 Impact sur le maïs	30
3.1.3 Impact sur le tournesol	34
3.1.4 Synthèse sur le facteur pédologique : Comment réagissent les rendements au réchauffement du climat pour les différents types de sol ?	38
3.2 Quels est l'impact possible du réchauffement climatique sur la production des cultures (blé, maïs, tournesol) de la zone RUK ?	40
3.2.1 Les limites de l'exercice	40
3.2.2 A surface cultivées constantes, quelle serait la production agricole avec les rendements futurs influencés par le réchauffement climatique ?	40
3.2.3 Comment pourraient évoluer les surfaces cultivées, et donc la production, sous l'influence du réchauffement climatique ?	46
3.3 Quelle est la sensibilité du blé à l'augmentation ou à la baisse de la température et de la pluviométrie ?	48
4. POUR ALLER PLUS LOIN	53
4.1 Les impacts du changement climatique pourraient modifier significativement la production des céréales et oléagineux dans la zone RUK	53
4.2 Les cultures réagissent de façon différente au changement climatique	54
4.3 Les modifications effectives dépendront d'autres facteurs que le seul changement climatique, en particulier de l'évolution des techniques culturelles	55
4.4 Les baisses de productions mises en évidence sont essentiellement dues à une augmentation du stress hydrique des plantes : l'irrigation sera alors un outil majeur d'adaptation au CC	55
4.5 Perspectives d'approfondissements	58
ANNEXES	59
Annexe 1. Bibliographie	
Annexe 2. Détail de la définition des zones climatiques	
Annexe 3. Détail de la méthodologie pour la définition des zones de sol	
Annexe 4. Précisions sur les projections climatiques utilisées	
Annexe 5. Cartes d'impact du changement climatique sur le rendement en fonction des sols et des ZC	
Annexe 6. Aire de répartition du blé, du maïs et du tournesol en 2005	

TABLE DES ILLUSTRATIONS

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Historique des surfaces en blé en ha.....	3
Figure 2 : Historique de production de blé en tonne	4
Figure 3 : Anomalies de températures pour le mois de juillet 2010	4
Figure 4 : Exportateurs et importateurs mondiaux de blé	5
Figure 5 : Evolution des surfaces en maïs en ha	5
Figure 6 : Les principaux exportateurs de maïs en 2011 (tonne)	6
Figure 7 : Evolution des exportations de maïs de l'Ukraine depuis 2000 (tonne)	6
Figure 8 : Comparaison des rendements du blé, du maïs et du tournesol. RUK et France	7
Figure 9 : Evolution des rendements du blé sur la période 1960-2008	7
Figure 10 : Principaux exportateurs de céréales en 2013/2014	8
Figure 11 : Evolution des exportations de céréales de la zone RUK	9
Figure 12 : Les utilisations de l'huile de tournesol en France en 2010	9
Figure 13 : Les 5 plus gros exportateurs d'huile de tournesol en 2011	10
Figure 14 : Evolution des surfaces en Tournesol.....	10
Figure 15 : Evolution de la production de tournesol.....	11
Figure 16 : Zones climatiques	15
Figure 17 : Carte des sols	19
Figure 18 : Croisement zones pédologiques x zones climatiques	24
Figure 19 : Perte / gain de rendement pour la culture du blé, scénario Bas (CGM31) et scénario extrême (MIROC32).....	28
Figure 20 : Nombre d'années dont le rendement est inférieur à 1 t/ha sur les différentes ZC. Sol S1, blé.....	29
Figure 21 : Comparaison chronique de rendement actuelle et future, ZC10, S1, Blé, scénario modéré	29
Figure 22 : Comparaison chronique de rendement actuelle et future, ZC10, S1, Blé, scénario extrême	30
Figure 23 : Perte / gain de rendement pour la culture du maïs, scénario modéré (CGM31) et scénario extrême (MIROC32).....	31
Figure 24 : Rendement espéré 4 années sur 5 par ZC, sol S1, Maïs, scénario extrême	33
Figure 25 : Comparaison chronique de rendement actuelle et future, ZC7, S1, Maïs, CGM31	33
Figure 26 : Comparaison chronique de rendement actuelle et future, ZC7, S1, Maïs, MIROC32	34
Figure 27 : Perte / gain de rendement pour la culture du tournesol, scénario modéré (CGM31) et scénario extrême (MIROC32)	35
Figure 28 : Nombre d'années dont le rendement est inférieur à 1 t/ha sur les différentes ZC. Sol S1, tournesol.....	36
Figure 29 : Comparaison chronique de rendement actuelle et future, ZC7, S1, Tournesol, CGM31	37
Figure 30 : Comparaison chronique de rendement actuelle et future, ZC7, S1, Tournesol, MIROC32	37
Figure 31 : Evolution du rendement du blé en fonction du type de sol, scénario modéré, toutes ZC confondues.....	38
Figure 32 : Evolution du rendement du blé en fonction du type de sol, scénario extrême, toutes ZC confondues.....	39
Figure 33 : Scénario modéré, impact sur la production de blé	42
Figure 34 : Scénario extrême, impact sur la production de blé	42
Figure 35 : Scénario modéré, impact sur la production de maïs	44
Figure 36 : Scénario extrême, impact sur la production de maïs	44
Figure 37 : Scénario modéré, impact sur la production de tournesol	46
Figure 38 : Scénario extrême, impact sur la production de tournesol.....	46
Figure 39 : Graphique 3D, impact pluie/température sur le blé	48
Figure 40 : Graphique 2D, impact pluie/température sur le blé	49

Figure 41 : Graphique 3D, impact pluie/température sur le blé	50
Figure 42 : Graphique 2D, impact pluie/température sur le blé	50
Figure 43 : Graphique 3D, impact pluie/température sur le blé	51
Figure 44 : Graphique 2D, impact pluie/température sur le blé	51
Figure 45 : Synthèse de l'évolution des productions à surfaces sont constantes	53
Figure 46 : Comparaison des rendements des trois cultures dans la ZC4, sol S1, scénario extrême	54
Figure 47 : Comparaison des rendements des trois cultures dans la ZC7, sol S1, scénario extrême	54
Figure 48 : Représentation du stress hydrique (ExpStr) et du stress de température (TempStr) par ZC pour le sol S1 et suivant le scénario Extrême (modèle climatique MIROC32).....	56
Figure 49 : Chronique 2046-2065 des besoins d'irrigation du blé sur la ZC10 et sol S1, MIROC32 (en mm/ha).....	57

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Place de l'agriculture au sein de la population des pays RUK	1
Tableau 2 : Utilisation des terres	1
Tableau 3 : Synthèse de l'aptitude culturale des sols	21
Tableau 4 : Croisement entre zone climatique et type de sol	24
Tableau 5 : Impact possible du réchauffement climatique sur les rendements du Blé	27
Tableau 6 : Impact possible du réchauffement climatique sur les rendements du Maïs	31
Tableau 7 : Impact possible du réchauffement climatique sur les rendements du Tournesol	35
Tableau 8 : Réserve Utile (RU) par type de sol utilisée pour le paramétrage d'Aquacrop	39
Tableau 9 : Comparaison production de référence (base 100) et future pour le blé (hypothèse 1: surface constante)	41
Tableau 10 : Comparaison production de référence (base 100) et future pour le maïs (hypothèse 1 : surface constante)	43
Tableau 11 : Comparaison production de référence (base 100) et future pour le tournesol (hypothèse 1 : surface constante)	45

PRÉAMBULE

Le Ministère français de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt a confié à BRLingénierie, la réalisation de l'Étude de l'effet du changement climatique sur le potentiel de développement des productions végétales en Russie, Ukraine et Kazakhstan à moyen terme.

L'Ukraine, le Kazakhstan et le Russie sont des pays à très forte valeur agricole du fait de leur positionnement géographique et de la nature de leurs sols. L'agriculture est par nature fortement dépendante des conditions climatiques. Cette dépendance explique, pour partie, la forte volatilité des prix des matières premières agricoles sur le marché mondial. Les changements climatiques déjà à l'œuvre et se poursuivre à court, moyen et long terme auront ainsi un impact très fort sur la production agricole, et donc sur les marchés. Cela pourra se manifester par une augmentation des températures, une modification de la pluviométrie mais aussi certainement par une plus grande variabilité du climat sur une même zone géographique, ou encore par l'occurrence plus fréquente d'épisodes climatiques extrêmes (sécheresse, inondation, grêle, tornade, ...).

Les filières céréaliers française et européenne sont fortement soumises à l'influence de la production de ces trois pays. La connaissance de l'évolution possible de leur production en fonction des scénarios de changement climatique, devient une information stratégique majeure.

Comment le changement climatique va-t-il impacter les rendements ? Certaines cultures vont-elles être impactées négativement et d'autres positivement ? Quel sera le solde entre les pertes et les gains de production ? Certains pays vont-ils être plus favorisés que d'autres ? Est-ce que de nouveaux espaces productifs agricoles vont apparaître ? A l'inverse, des zones d'abandon de l'agriculture vont-elles se créer ?

Cette étude apporte un éclairage sur ces interrogations.

L'exercice est cependant complexe. Il demande de faire l'intégration de nombreux paramètres dont chacun porte une incertitude élevée. On note en particulier les difficultés suivantes :

- ▶ La zone d'étude représentée par les 3 pays Ukraine, Kazakhstan et Russie, représente une zone géographique immense qui recouvre une grande diversité de situations agro-climatiques ;
- ▶ Tous les modèles de changement climatique ne concluent pas de la même façon sur les évolutions possibles du climat sur une même zone géographique ;
- ▶ Le lien entre potentiel de production et surface réellement cultivée (et donc production réelle), n'est pas du tout simple à mettre en évidence. Ce n'est pas parce qu'il est possible de cultiver du blé sur une nouvelle zone géographique dans le futur que forcément cette zone sera mise en valeur. De nombreux autres paramètres, notamment socio-économiques, entrent en jeu. Or ces paramètres ne sont pas pris en compte dans cette étude ;
- ▶ Enfin, l'agriculture a toujours su évoluer pour faire face aux changements qu'elle subit de façon continue. Il est ainsi probable que les changements climatiques des années à venir engendreront des adaptations culturelles afin de maintenir la productivité agricole. Des agriculteurs et des gouvernements pourront par exemple envisager l'irrigation. Des surfaces impactées fortement par les changements à venir pourront ainsi quand même être cultivées, mais dans un mode de mise en valeur différent. Ce point engendrera un biais dans les résultats présentés.

Cette étude met ainsi en lumière des grandes tendances et des trajectoires possibles, mais **les chiffres présentés doivent être pris avec beaucoup de prudence compte-tenu des nombreux biais inhérents à tout travail prospectif sur le changement climatique.**

Le présent rapport est découpé en 4 grands chapitres :

- ▶ Le premier chapitre présente rapidement des éléments clés pour l'étude sur l'agriculture des trois pays et les cultures retenues pour les simulations : blé, maïs et tournesol ;
- ▶ Le deuxième chapitre détaille succinctement les éléments de méthodologique de l'étude ;
- ▶ Le troisième chapitre présente les principaux résultats des modélisations ;
- ▶ Enfin, le dernier chapitre résume en quelques points les conclusions saillantes de l'étude.

1. L'IMPORTANCE DES CULTURES DE BLÉ, MAÏS ET TOURNESOL EN RUSSIE, UKRAINE ET KAZAKHSTAN

1.1 TROIS PAYS FORTEMENT AGRICOLES

La **Russie** est le plus vaste pays de la planète avec près de 17 millions de km². Compte tenu des contraintes climatiques et de l'étendue des zones montagneuses, seuls 7,7 % des terres russes sont cultivables. Les meilleures terres sont situées au sud de la forêt boréale, ce sont les terres noires ou chernozem.

Le **Kazakhstan** figure au neuvième rang des pays les plus étendus au monde. Les terres agricoles (situées surtout en zone de steppe) couvrent une superficie de 24 millions d'hectares, ce qui fait du Kazakhstan le 2^{ème} pays au monde pour la disponibilité en terres arables par habitant.

L'**Ukraine** s'étend sur 603 000 km² soit une surface légèrement supérieure à celle de la France. L'agriculture est un des seuls secteurs exportateurs du pays, les principales productions ukrainiennes sont le blé, l'orge, la betterave et la pomme de terre. Les cultures plus secondaires mais présentes de manière importante sur son territoire sont le soja, le tournesol et le maïs.

La richesse de ces pays est en assez grande partie due à l'agriculture (le secteur représente au moins 5% du PIB), derrière l'exploitation du gaz naturel. La population rurale du Kazakhstan et de l'Ukraine est plus élevée que celle de la Russie. La Russie avec 26% de population rurale se situe sensiblement au même niveau que l'Europe (23%).

Tableau 1 : Place de l'agriculture au sein de la population des pays RUK

	Kazakhstan	Ukraine	Russie
Population totale	17 millions	45 millions	144 millions
% population rurale	47%	32%	26%
Population active agricole	4 millions	4 millions	7 millions
% de l'agriculture dans le PIB	5,5%	8,5%	5,0%

Source : <http://www.indexmundi.com>, http://ukrexport.gov.ua/eng/about_ukraine/population/ukr/179.html

Seule une faible partie de la superficie est utilisée pour l'agriculture. Elle se répartie essentiellement à l'ouest et au sud de la Russie. **La majorité des surfaces cultivées concernent les grandes cultures céréalières comme le blé, le maïs, dans une moindre mesure le tournesol et la betterave.**

Le blé constitue plus de 50% de la production de céréale en Russie. Il constitue la principale ressource agricole (88% du total des récoltes et 70% de la surface agricole du Kazakhstan par exemple).

Tableau 2 : Utilisation des terres

Millions d'ha (2012)	Russie	Ukraine	Kazakhstan	Total	UE (28)
Superficie totale	1 637,8	57,9	269,9	1 965,6	446,3
Terres arables	121,6	32,5	22,9	177,0	107,5
Cultures permanentes	1,8	0,9	0,1	2,8	11,5
Forêts	808,9	9,7	3,3	821,9	179,4

Source : Country Profile FAO

Les terres arables représentent des parts variables de la superficie totale des pays ; elles sont faibles pour la Russie et le Kazakhstan (respectivement 7,4% et 8,5 %) et forte pour l'Ukraine avec 55%. Néanmoins à l'échelle mondiale les surfaces arables de la zone RUK représentent 13 % de la surface arable totale.

1.2 DES CONSÉQUENCES DÉFAVORABLES À L'AGRICULTURE SUITE AU DÉMANTÈLEMENT DE L'EX-URSS, DES OPPORTUNITÉS AUJOURD'HUI

DE GRANDS CHANGEMENTS FONCIERS SUITE AU DÉMANTÈLEMENT DE L'URSS

En 1991, l'ex-URSS est démantelée. L'Ukraine et le Kazakhstan obtiennent leur indépendance. Une crise sévère apparaît alors dans le domaine agricole pour les 3 pays. La production agricole chute fortement, l'utilisation des engrains également. La disparition des aides de l'Ex-Union soviétique sur les intrants et le soutien aux prix agricoles ayant disparu, les agriculteurs se retrouvent dans des situations financières dramatiques. L'ancien système, centralisé et planifié, est remplacé par un système orienté vers le marché auquel les exploitations agricoles n'étaient pas préparées. Une des conséquences a été la réduction drastique du cheptel et des surfaces fourragères correspondantes (baisse de 40% en Russie des superficies en herbe). Avec l'effondrement du nombre d'animaux, la quantité de fumier disponible a été considérablement réduite avec une conséquence sur les rendements des cultures. **La période 1990-2000 a constitué une phase de transition avec un fort déclin des investissements agricoles et une réorganisation interne des exploitations agricoles qui ont conduit à l'accès à la propriété privée de la terre.**

Au sortir de la période soviétique, deux formes d'exploitations agricoles coexistent :

- ▶ **les exploitations collectives** (kolkhozes ou coopératives et sovkhozes ou fermes d'Etat) rassemblent plusieurs centaines de travailleurs sur plusieurs milliers d'hectares, avec une organisation du travail par ateliers fortement spécialisés.
- ▶ **Les exploitations de lopins** de quelques ares que les membres des exploitations collectives cultivent près de leur habitation.

Depuis la fin des années 1990, des investisseurs interviennent dans la reprise des exploitations collectives en difficulté et contribuent à renouveler leurs équipements et à les regrouper. Ces investisseurs peuvent être des membres de l'élite politique ou industrielle du pays, ou des agro-investisseurs nationaux ou étrangers implantés dans le commerce international de produits agricoles ou dans l'agro-industrie.

Pour les trois pays, l'ouverture de l'agriculture à l'économie de marché offre des perspectives de développement importantes compte-tenu du potentiel de production de la zone.

ZOOM SUR L'UKRAINE

En mai 2008, l'Ukraine devient un nouveau membre de l'Organisation Mondiale du Commerce (OMC), ce qui a conduit à des changements considérables dans les instruments de soutien à l'agriculture et dans l'utilisation de l'Ukraine de mesures de politique commerciale. La Russie a intégré l'OMC en 2012 et le Kazakhstan est toujours en phase d'observation.

Aujourd'hui, à la suite du partage des ressources, notamment foncières, des kolkhozes et sovkhozes au cours de la réforme agraire post-socialiste, 6,8 millions de petits propriétaires, avec une surface moyenne de moins de 4 ha, constituent la base foncière agricole de l'Ukraine. La structure des exploitations agricoles ukrainiennes connaît une dynamique d'évolution relativement rapide.

Se combinent :

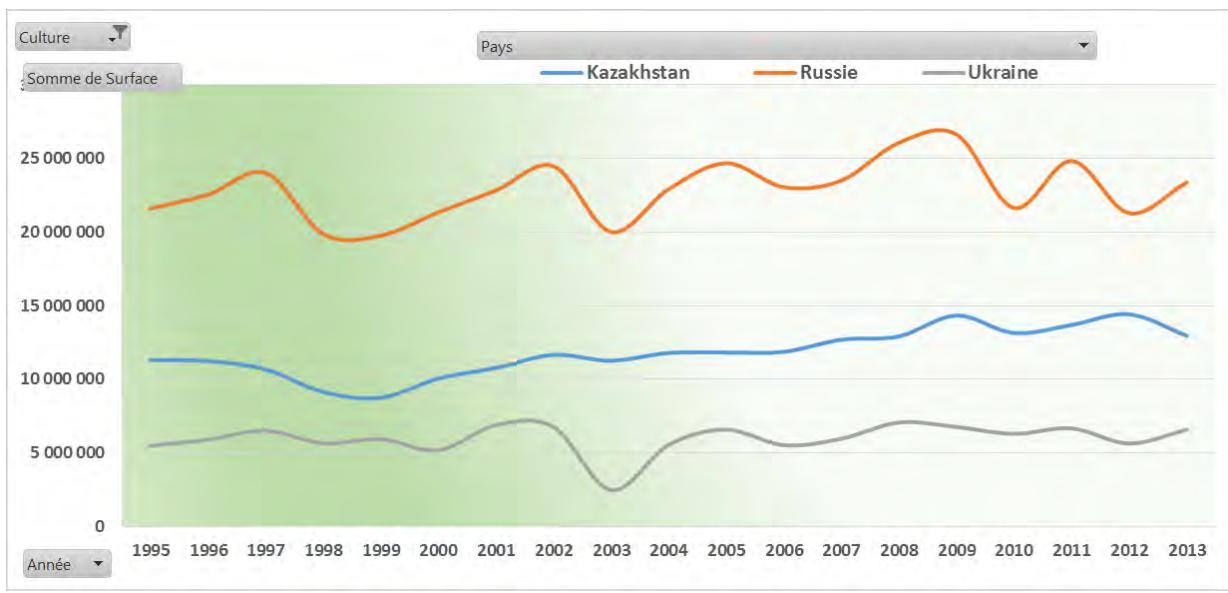
- ▶ près de **15 000 grandes exploitations** de plusieurs milliers, dizaines, voire centaines de milliers d'hectares, issues des anciennes exploitations collectives (kolkhozes et sovkhozes). Parmi elles, les grandes exploitations céréaliers (70 agroholdings) sont en progression et occupent de plus en plus de foncier, mais sont confrontées à des problèmes de gestion opérationnelle et logistique ;
- ▶ environ **42 000 exploitations** dites fermières, issues de la réforme agraire post-soviétique, exploitant généralement de 50 à quelques milliers d'hectares. Ces fermiers indépendants essaient de se développer mais les conditions de crédit et de soutien de l'État ne sont pas favorables ;
- ▶ **5,4 millions de micro-exploitations**, fondées sur des lopins villageois d'environ un hectare (la plupart de ces microexploitants étant par ailleurs propriétaires d'une part foncière issue de la redistribution et louée à un autre exploitant, souvent de plus grande taille).

Environ 60% de la production agricole brute, notamment des fruits, des légumes et des produits animaux, est fournie par les micro-exploitations, sur environ 40% de la surface agricole du pays. L'essentiel de la production de céréales (63 Mt en 2013, dont 50 Mt récoltées par les entreprises agricoles) et d'oléagineux (16 Mt en 2013 dont 14 Mt récoltées par les entreprises agricoles) est assurée par les exploitations spécialisées des deux premières catégories, qui louent des terres aux collectifs de petits propriétaires.

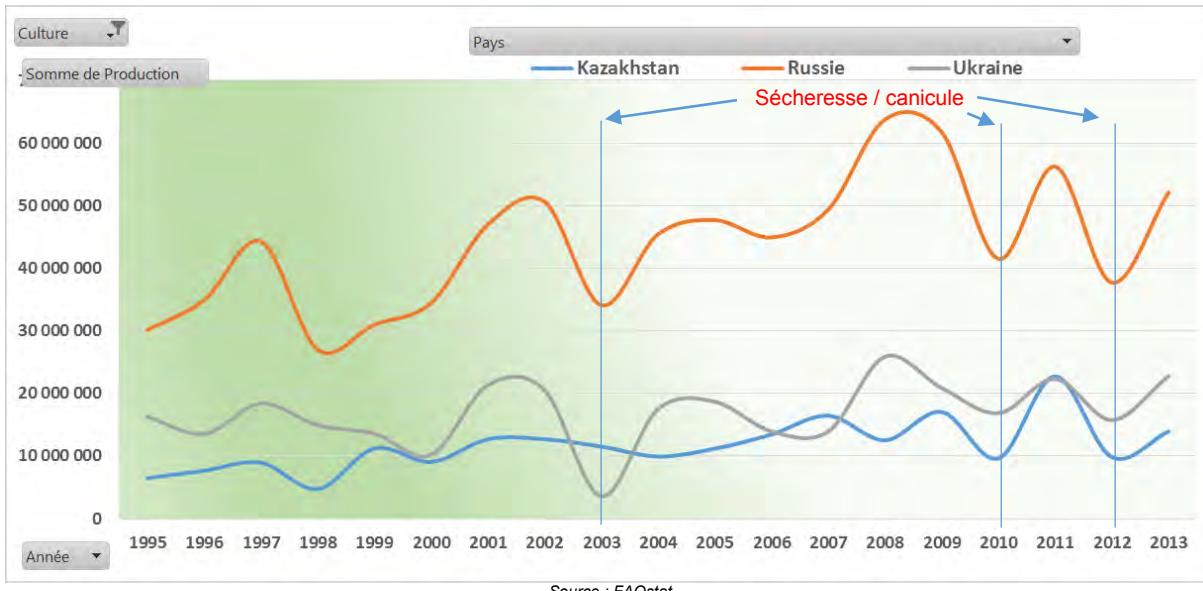
1.3 DES SURFACES EN BLÉ CONSIDÉRABLES

Ces 20 dernières années, la surface en blé de la Russie évolue entre 20 et 27 millions d'ha (soit 1,3 % de la superficie), celle du Kazakhstan est en moyenne de 12 millions d'ha (4,4% de la superficie), et pour l'Ukraine elle atteint 6 millions d'hectares (10% de la superficie).

Figure 1 : Historique des surfaces en blé en ha



Source : FAOstat

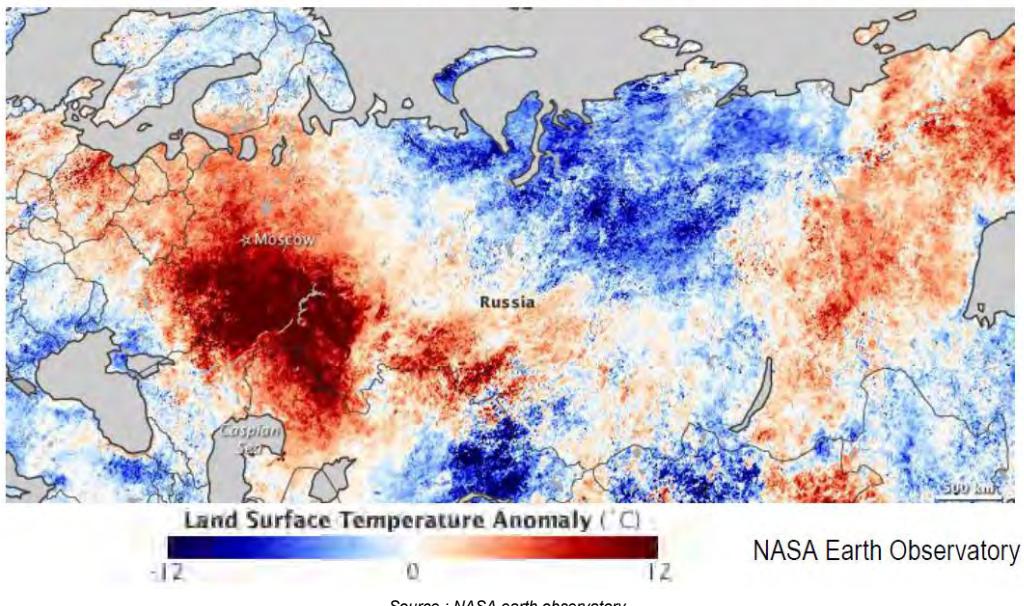
Figure 2 : Historique de production de blé en tonne

Source : FAOstat

Les variations interannuelles de production sont essentiellement dues aux mauvaises conditions climatiques. La figure ci-dessous illustre ce phénomène pour l'année 2010 où des excès extrêmes de températures (jusqu'à plus de 10°C par rapport à la moyenne) ont été constatés et ont conduit à très fortes baisses de production en Russie.

Figure 3 : Anomalies de températures pour le mois de juillet 2010

2010 heat wave: July temperature anomalies



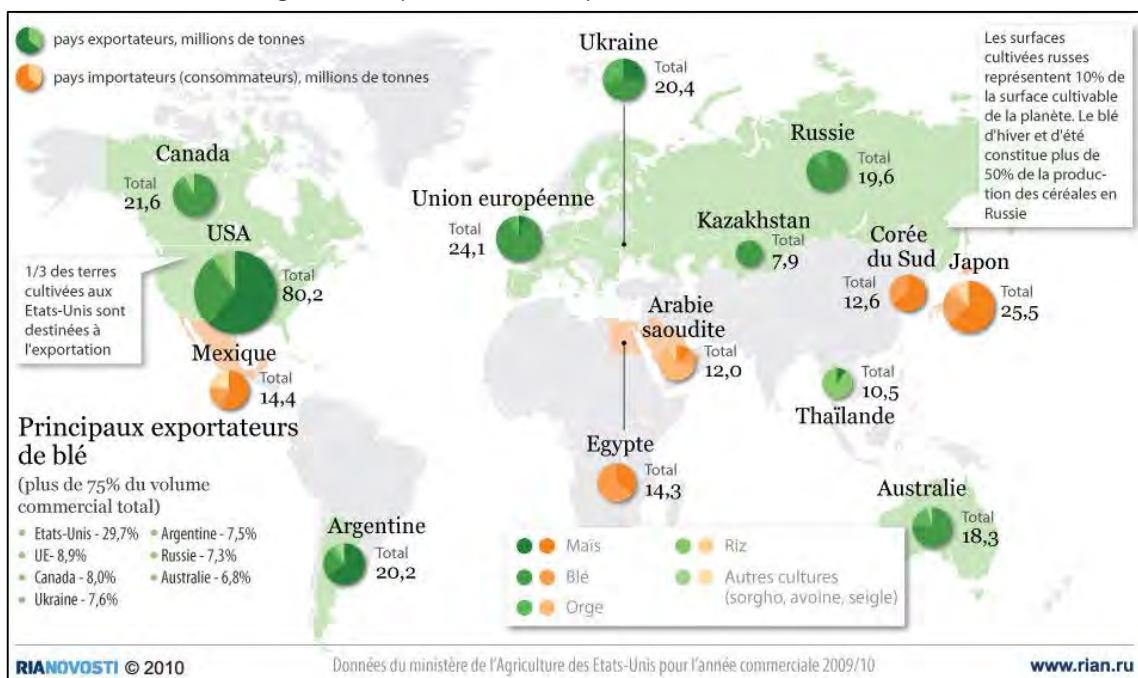
Source : NASA earth observatory

NASA Earth Observatory

La place dans le marché mondial du blé pour les 3 pays est de plus en plus grande. Ils comptent à hauteur de 20% entre 2004 et 2009 au sein du marché mondial, alors que cette part n'était que de 10% dans les années 90¹.

¹ Article U.S. Wheat trade, Liefert O., 2013, in <http://www.ers.usda.gov/topics/crops/wheat/trade.aspx>

Figure 4 : Exportateurs et importateurs mondiaux de blé

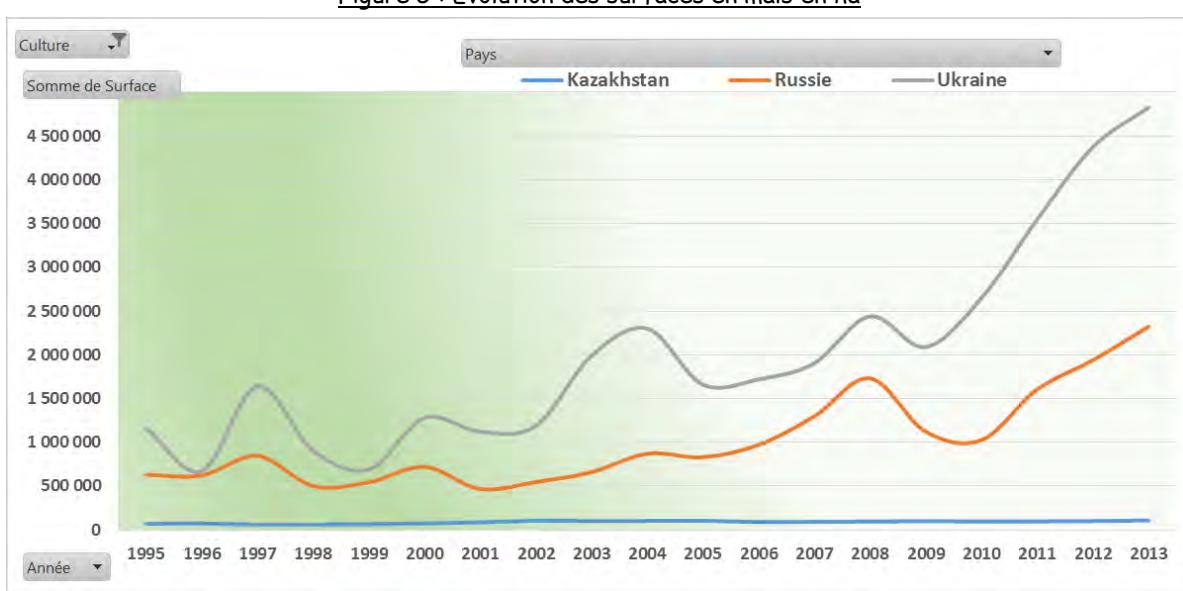


En 2013, la production de blé russe représente 7% de la production mondiale de blé, soit le 5^{ème} rang (FAOstat), celle du Kazakhstan 2 % et celle de l'Ukraine 3%.

1.4 UN TRÈS FORT DÉVELOPPEMENT DE LA CULTURE DU MAÏS, PRINCIPALEMENT EN RUSSIE ET UKRAINE

Depuis 2010, les surfaces en maïs se sont intensément développées en Ukraine et en Russie. Le Kazakhstan ne suit pas la même tendance.

Figure 5 : Evolution des surfaces en maïs en ha



Le développement du maïs en Ukraine s'explique par la combinaison de plusieurs facteurs :

- ▶ La productivité du maïs qui valorise très bien les terres noires : 6 t/ha pour le maïs contre 3 t/ha pour le blé ;
- ▶ La spécialisation de nombreux agroindustriels intégrés (agriculture + élevage) sur cette culture qui permet de fournir l'amidon des concentrés pour l'alimentation animale (vache laitière, porc, volaille) ;
- ▶ Le fort développement de la filière volaille qui consomme de grandes quantités de maïs ;
- ▶ Les prix élevés du maïs sur le marché international.

L'Ukraine était le 4^{ème} exportateur de maïs (5% du marché mondial) en 2011. Avec les Etats-Unis, le Brésil, et l'Argentine, ces 4 pays représentent plus de 80 % des surfaces de maïs cultivées dans le monde. L'Ukraine est devenue, en 2013/14, le 3^{ème} exportateur mondial de maïs derrière les États-Unis et le Brésil avec quelque 19 Mt embarquées, dont plus de 40 % à destination de l'UE².

Figure 6 : Les principaux exportateurs de maïs en 2011 (tonne)

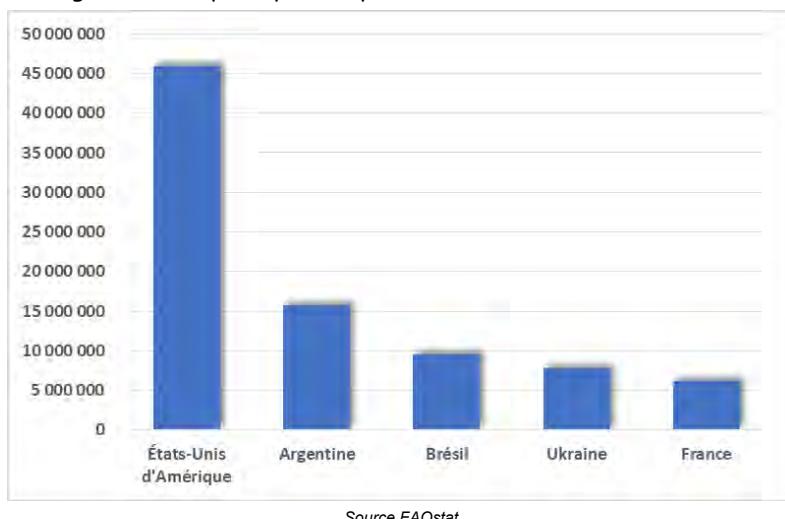
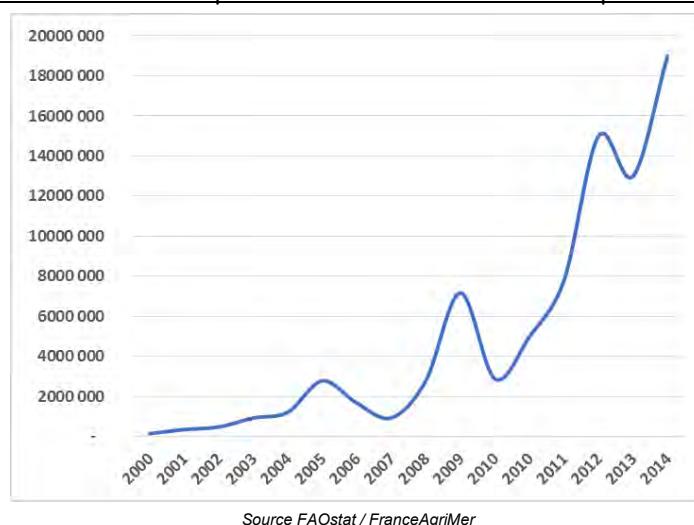


Figure 7 : Evolution des exportations de maïs de l'Ukraine depuis 2000 (tonne)



² Les synthèses de FranceAgriMer Mai 2014 • numéro 18 GRANDES CULTURES « Situation du marché des céréales en Ukraine et dans le bassin de la mer noire »

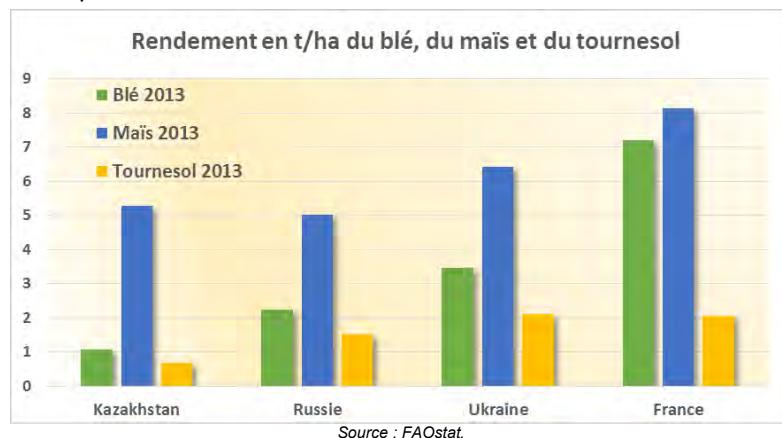
1.5 DES RENDEMENTS EN-DESSOUS DU POTENTIEL DE PRODUCTION

Les rendements de blé en RUK sont largement en-dessous de la moyenne des grands pays céréaliers. Sur les 5 dernières années (2009-2013), le rendement moyen de blé du Kazakhstan était de 1 t/ha, celui de la Russie de 2,1 t/ha et celui de l'Ukraine de 2,1 t/ha. Les rendements français se situent en moyenne autour de 7 t/ha.

L'écart est moins important pour le maïs. On reste malgré tout loin du potentiel de production avec environ 5 t/ha pour le Kazakhstan et la Russie et jusqu'à plus de 6 t/ha pour l'Ukraine. Le rendement moyen français se situe autour de 8 t/ha.

Enfin pour le tournesol, l'Ukraine obtient des rendements équivalents à ceux de la France autour de 2 t/ha. La Russie est à 1,6 t/ha et le Kazakhstan autour de 1 t/ha.

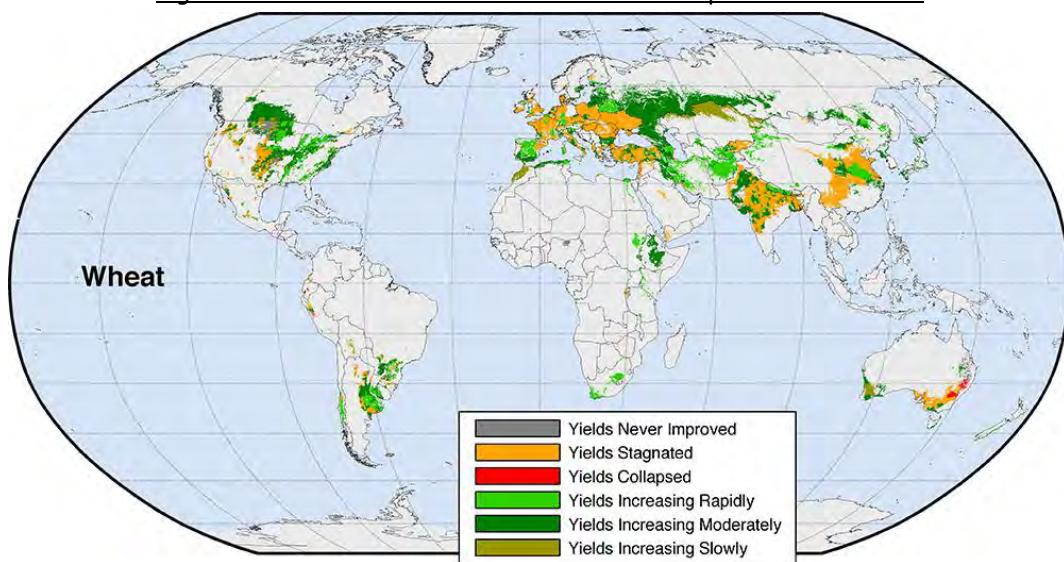
Figure 8 : Comparaison des rendements du blé, du maïs et du tournesol. RUK et France



Ces écarts de rendements s'expliquent par une faible utilisation d'intrants tels que les engrains et les herbicides, ainsi qu'un niveau de mécanisation encore insuffisant. Après 1991, les quantités d'engrais appliquées à l'hectare ont été réduites de 7 à 10 fois en Ukraine (FAO). Avec l'ouverture de ces pays au libre échange international, l'accessibilité aux intrants agricoles s'est fortement améliorée et ces rendements évoluent à la hausse pour rattraper à terme ceux de la France.

Le gain de production que l'on peut attendre d'une amélioration des techniques culturales dans les trois pays est considérable.

Figure 9 : Evolution des rendements du blé sur la période 1960-2008



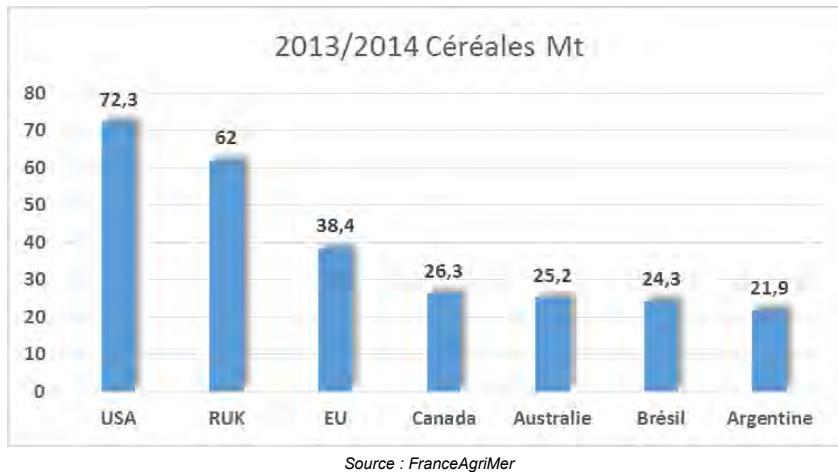
La carte ci-dessus montre que la zone RUK fait partie des zones où le rendement du blé a le plus augmenté sur la période 1960-2008.

1.6 UNE PLACE MAJEURE DANS LE MARCHÉ MONDIAL DES CÉRÉALES

La place dans le marché mondial pour les 3 pays est majeure. La zone RUK est le **2^{ème} exportateur de céréale au monde** après les USA. En 2013/14, la production de céréales dans les trois pays du bassin de la mer Noire : Russie, Ukraine, Kazakhstan, est estimée à 167 Mt. Il s'agit de la troisième meilleure récolte après celles des campagnes 2008/09 et 2011/12.

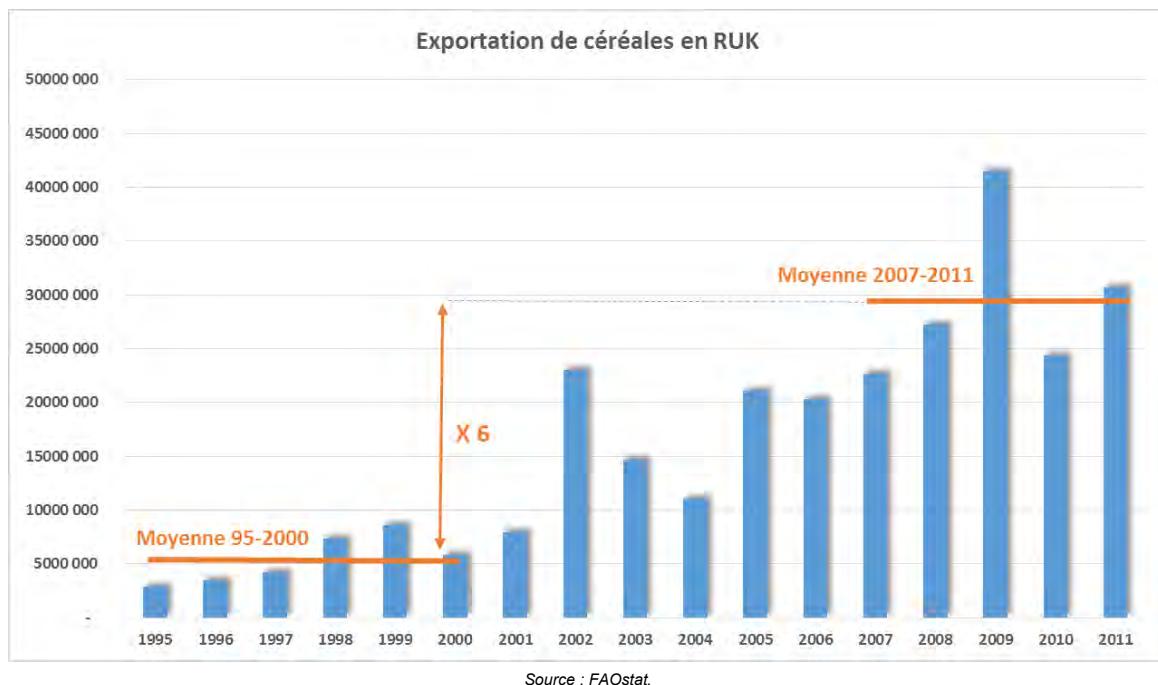
Les trois pays ont engrangé 45 Mt de plus que lors de la campagne 2012/13 fortement touchée par la sécheresse. Le rythme des exportations a été très rapide : le total cumulé des exportations des trois pays au début du mois de mars 2014 a dépassé le niveau des exportations de la même période des campagnes précédentes³.

Figure 10 : Principaux exportateurs de céréales en 2013/2014



Le développement des exportations de céréales au cours des dernières années est principalement lié à une forte hausse des exportations de maïs, qui atteindra peut être bientôt le volume de celles de blé. Les exportations de céréales ont été multipliées par 6 entre la période 95-2000 et la période 2000-2011 comme le montre le graphique suivant.

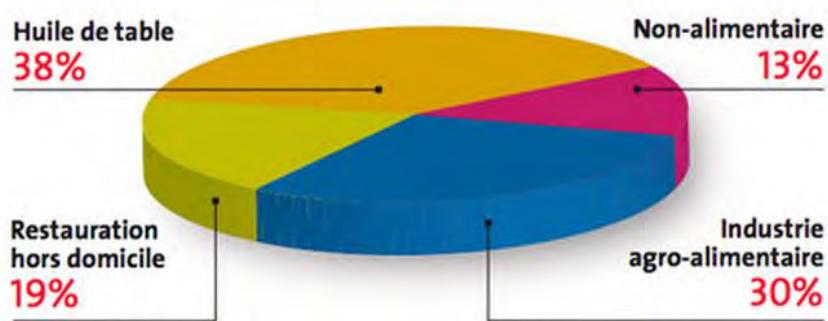
³ Les synthèses de FranceAgriMer - Mai 2014 - numéro 18 GRANDES CULTURES « Situation du marché des céréales en Ukraine et dans le bassin de la mer noire »

Figure 11 : Evolution des exportations de céréales de la zone RUK

La variabilité des exportations de la Russie, de l'Ukraine et du Kazakhstan est considérable. Au cours des 10 dernières années l'écart type de leur récolte est de 17,8 Mt et celui de leur offre à l'export est de plus de 10 Mt. **Cette instabilité (structurelle) des exportations des pays du bassin de la mer Noire est une des causes majeures des évolutions erratiques des cours mondiaux du blé⁴.**

1.7 DES SURFACES EN TOURNESOL EN FORTE PROGRESSION

Le marché mondial de l'huile de tournesol est actuellement en pleine croissance pour compenser le déclin de l'approvisionnement en colza. Le tournesol est utilisé en alimentation humaine sous forme d'huile alimentaire, en alimentation animale sous forme de tourteaux, en addition aux dérivés du pétrole pour fabriquer des biocarburants, et enfin pour certains débouchés non alimentaires (polymères, intermédiaire de synthèse).

Figure 12 : Les utilisations de l'huile de tournesol en France en 2010

Source : Onidol.

⁴ FranceAgriMer 2011, « Marché mondial du blé. Les causes d'une instabilité croissante »

La production d'huile de tournesol en Ukraine a débuté au milieu du 19^{ème} siècle. Les conditions environnementales et les caractéristiques du terrain permettent en effet la culture du tournesol sur tout le territoire de l'Ukraine. Les conditions sont également favorables dans le sud de la Russie et dans le nord du Kazakhstan.

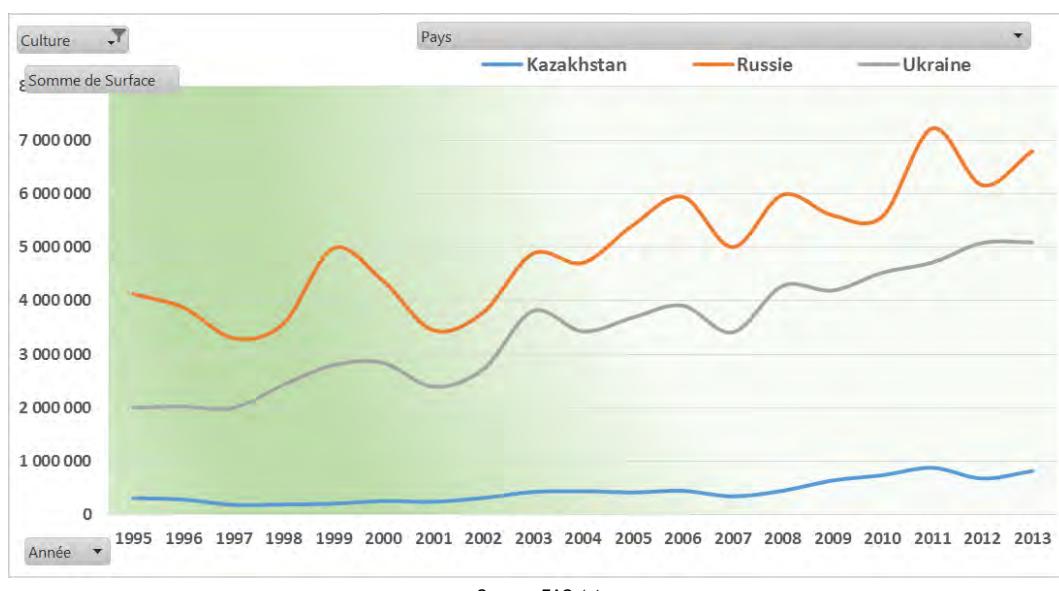
L'Ukraine est le premier exportateur d'huile de tournesol au monde avec près de 40% des exportations mondiales.

Figure 13 : Les 5 plus gros exportateurs d'huile de tournesol en 2011

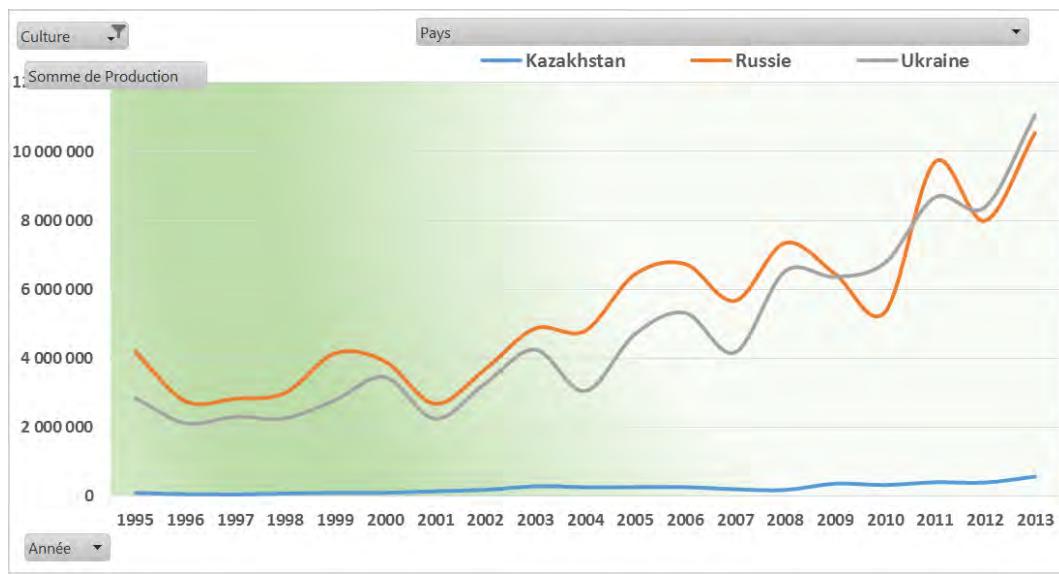


90% de la production d'huile de tournesol de l'Ukraine est aujourd'hui exportée, ce qui en fait l'acteur majeur de ce secteur.

Figure 14 : Evolution des surfaces en Tournesol



C'est la Russie qui dispose des surfaces les plus importantes avec près de 7 millions d'hectares. L'Ukraine a atteint 5 millions d'hectares en 2013 et le Kazakhstan reste en dessous de 1 million d'hectares.

Figure 15 : Evolution de la production de tournesol

Source : FAOstat.

L'Ukraine a dépassé la Russie en production avec plus de 11 millions de tonnes contre 10 millions alors que les surfaces sont inférieures. Le niveau de rendement est plus élevé en Ukraine (1,7 t/ha de moyenne sur les 5 dernières années) qu'en Russie (1,2 t/ha). Le Kazakhstan se situe à un niveau de production très inférieur aux 2 autres pays, mais il a malgré tout multiplié par 5 sa production entre 2000 et 2013. Le Kazakhstan est aujourd'hui autosuffisant en huile de tournesol alors qu'il était importateur net jusqu'en 2009. On peut imaginer que ce pays va poursuivre cette tendance, et pourrait devenir exportateur à court terme.

1.8 UNE ACTUALITÉ GÉOPOLITIQUE RÉCENTE QUI PEUT AVOIR DES CONSÉQUENCES IMPORTANTES POUR L'AGRICULTURE UKRAINIENNE

Extrait de : Les synthèses de FranceAgriMer - Mai 2014 - numéro 18 GRANDES CULTURES « Situation du marché des céréales en Ukraine et dans le bassin de la mer noire »

Les événements qui malmènent l'Est de l'Ukraine incitent les opérateurs à faire preuve d'une grande prudence vis-à-vis du marché ukrainien.

Outre la disparition de près de 1 200 000 ha de terres arables de la péninsule, la perte de la Crimée a des conséquences pour la commercialisation des céréales et oléagineux de l'Ukraine. Ce pays est également privé des capacités de stockage et de manipulation des grains de la Crimée, qui représentent au total 1,9 Mt. Il est à noter que ces capacités sont désormais inutilisables car elles sont coupées de l'essentiel de leur hinterland. Le terminal céréalier de Sébastopol par lequel ont transité en 2013/14 plus de 1,2 Mt de céréales est particulièrement affecté. Celui de Marioupol risque de l'être également.

Le conflit russo-ukrainien pourrait priver l'Ukraine d'une grande partie de sa façade maritime. La poursuite de la sécession des régions de l'est, priverait le marché ukrainien de nouvelles installations portuaires telles que celles de Marioupol, de Kherson, de Nikolaïev, voire d'Odessa.

Dans le pire des scénarios, l'Ukraine pourrait perdre tous ses ports de la mer Noire, et n'aurait alors pour seul débouché maritime que celui qu'offrirait le Danube (3 ports fluviaux sont situés en Ukraine) via le port roumain de Constanta. Les grains ukrainiens devraient alors être exportés par camion ou par train vers l'UE, ou transiter par les ports de la Baltique. Une telle hypothèse risquerait de limiter fortement les capacités exportatrices de blé, d'orge et de maïs de l'Ukraine et de renchérir considérablement leurs prix.

Le soutien apporté par l'UE à l'Ukraine, sous la forme de contingents d'importation à droit réduit de céréales devrait, dans de telles conditions, contribuer, mais modestement, à un meilleur équilibre de l'agriculture ukrainienne. Et cela d'autant plus que les perspectives macroéconomiques ne sont pas très optimistes, à court terme.

2. CADRAGE MÉTHODOLOGIQUE

Comme nous l'avons présenté en préambule, l'exercice consistant à modéliser la croissance des végétaux à partir de simulations du climat dans le futur, est un travail complexe comportant de nombreuses incertitudes. Il a fallu de plus intégrer de fortes contraintes :

- ▶ *L'immensité de la zone d'étude.* Il a fallu continuellement trouver des niveaux d'agrégation des données permettant leur traitement en un temps raisonnable et sans mobiliser de ressource informatique non disponible ;
- ▶ *La difficulté à accéder à des données de base à une échelle précise.* Concernant les paramètres agronomiques tels que les surfaces par type de culture, les rendements et les productions, les informations étaient disponibles à l'échelle des pays (données FAOstat) mais difficilement à une échelle plus fine pour certains des pays ;
- ▶ *La diversité des pratiques agricoles et des systèmes de culture.* Cette diversité ne pouvait être représentée à l'échelle de la zone d'étude. Il a fallu homogénéiser certains paramètres agronomiques (variétés, date de semis, ...) afin d'être en mesure d'analyser les données produites suite aux simulations ;
- ▶ Les incertitudes sur le climat futur qui dépendent de modèles climatiques comportant des biais importants.

Il s'agit dans ce chapitre de présenter les grandes lignes des choix méthodologiques retenus. Pour plus d'information le lecteur se reportera aux annexes où le détail de la démarche est présenté précisément.

2.1 PRINCIPE GÉNÉRAL

La démarche générale consiste à calculer le rendement de trois cultures (blé, maïs, tournesol) avec un logiciel de simulation de croissance de plante, d'une part sous un climat de référence et d'autre part sous un climat futur possible, ceci afin de cerner une évolution possible du rendement sous l'effet de l'évolution climatique.

Nous avons utilisé le logiciel Aquacrop de la FAO.

Comme déjà indiqué, la démarche ignore de très nombreux facteurs du rendement liés aux itinéraires techniques effectivement pratiqués et cherche à comprendre le facteur climatique. Elle a toutefois bien intégré les variations des caractéristiques pédologiques à l'échelle de la zone d'étude.

Une fois établies les variations futures possibles des rendements des différentes cultures, nous avons donné une estimation des variations associées sur la production végétale en blé, maïs et tournesol à l'échelle de la zone d'étude.

Les sous-chapitres suivants exposent rapidement les hypothèses retenues sur :

- ▶ les cultures,
- ▶ le découpage de la zone en « zones climatiques »,
- ▶ les types de sol,
- ▶ le climat de référence et le climat futur possible,

ainsi que le plan de simulation adopté.

Trois annexes exposent des éléments plus détaillés sur :

- ▶ le découpage en zone climatiques (annexe 2),
- ▶ le découpage en zones pédologiques (annexe 3),
- ▶ les hypothèses concernant le changement climatique (annexe 4).

2.2 PRINCIPALES HYPOTHÈSES

2.2.1 Trois cultures

Les trois cultures que nous étudions sont le blé, le maïs et le tournesol.

Le blé et le maïs sont les deux céréales les plus cultivées dans les trois pays et représentent deux cultures d'exportation majeures. **L'absence de donnée permettant de distinguer le blé d'hiver et le blé de printemps** ne nous permet pas d'envisager cette distinction. La dénomination blé recouvrira aussi bien le blé de printemps que le blé d'hiver.

La limite de l'étude ne permettant pas la distinction entre blé de printemps et blé d'hiver a conduit aux points suivants :

- ▶ Le paramétrage du logiciel Aquacrop a été fait sur la base du blé de printemps ;
- ▶ Dans les exploitations agricoles, les rendements du blé de printemps sont inférieurs à ceux du blé d'hiver. Les rendements simulés sont ceux du blé de printemps et sont donc inférieurs à ceux qu'ils auraient été avec du blé d'hiver. Si l'on considère que la réalité de la zone cultivée étudiée contient les deux cultures, les rendements calculés sont donc légèrement sous-estimés ;
- ▶ Il n'a pas été possible d'étudier la possibilité de conversion d'une partie des surfaces cultivées en blé de printemps aujourd'hui en blé d'hiver dans le futur. **Cette possibilité pourrait être offerte aux agriculteurs avec le réchauffement des températures dans le futur.**

Le tournesol est retenu comme culture représentative de la catégorie des oléagineux. L'Ukraine est le premier exportateur d'huile de tournesol au niveau mondial. Cette culture est essentielle à l'économie de l'Ukraine et de la Russie (dans une moindre mesure pour le Kazakhstan).

2.2.2 Découpage en zones géographiques : 12 zones, 8 seront étudiées

DÉCOUPAGE

Les éléments détaillés concernant ce découpage sont exposés en annexe.

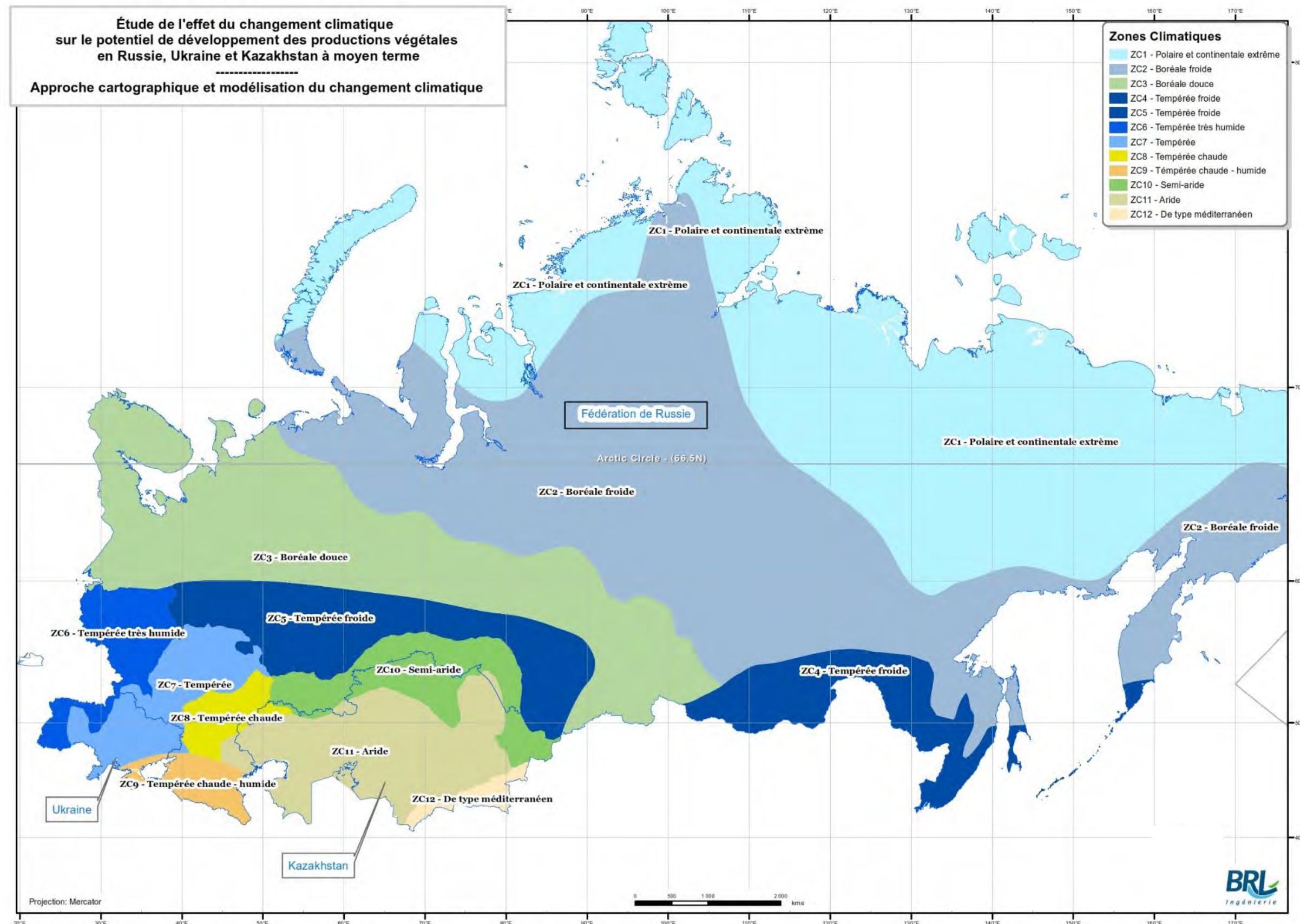
La source des données climatiques retenue est celle fournie par l'Unité de Recherche sur le Climat de l'Université de l'East Anglia (*Climatic Research Unit, University of East Anglia*) (CRU, 2014). Cette base de données répertorie 15 paramètres climatiques au pas de temps mensuel, à l'échelle mondiale et à la résolution $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ entre 1901 et 2013.

La résolution proposée par le CRU est très fine pour une zone d'étude de plusieurs millions de km^2 d'une part, et d'autre part, le climat est en général assez homogène sur une même zone topographique (plaine, montagne, vallées, piémont, ...). Il est donc apparu nécessaire d'agréger ces données de façon logique pour former des **unités de climat homogène**.

Plusieurs sources d'information bibliographique sur le zonage climatique ont alors été utilisées en complément de l'analyse des données CRU. Au final, ce sont 12 zones climatiques qui ont été définies afin de représenter le plus fidèlement possible la diversité climatique de la zone d'étude.

Ces zones climatiques sont présentées dans la carte suivante.

Figure 16 : Zones climatiques



8 ZONES RETENUES SUR 12

Parmi les 12 zones climatiques, 4 zones n'ont pas été retenues. Il s'agit :

- ▶ de la ZC1 (Climat polaire et continental extrême) et de la ZC2 (Boréale froide) dont les températures trop froides sont rédhibitoires à la mise en culture,
- ▶ de la ZC11 (climat aride) dont la pluviométrie est à peine supérieure à 200mm et ne permet pas la culture pluviale,
- ▶ de la ZC12 (type méditerranéen) dont les cultures sont exclusivement irriguées.

Au final ce sont donc 8 zones climatiques qui sont étudiées.

2.2.3 Quatre grands types de sol

Le détail de la classification pédologique est exposé en annexe.

Nous avons retenu la classification proposée par le GIEC⁵ comme référence car elle utilisée dans le cadre de simulation de changement climatique comme la présente étude.

Cette classification est celle utilisée pour les inventaires nationaux des émissions de gaz à effet de serre. Le GIEC (IPCC, 2006) propose des valeurs pas défaut des stocks de carbone (0-30 cm) dans ces sols selon cette classification et par type de climat.

On peut distinguer 8 groupes de sols :

- ▶ Groupe 1 : Les sols en « zems » : Chernozems, Greyzems, Kastanozems et Phaeozems.
- ▶ Groupe 2 : Les sols riches en calcium ou sodium (c'est-à-dire les sols carbonatés ou salinisés): Calcisols, Gypsisols, Solonchaks et Solonetz.
- ▶ Groupe 3 : Les autres sols argileux actifs : Anthrosols, Cambisols, Fluvisols, Leptosols, Luvisols, Podzoluvisols, Planosols, Regosols et Vertisols.
- ▶ Groupe 4 : Les sols sableux (Arenosols et Sand Dunes).
- ▶ Groupe 5 : les sols spodiques (Podzols).
- ▶ Groupe 6 : Sols des terres humides (Gleysols).
- ▶ Groupe 7 : Les sols volcaniques (Andosols).
- ▶ Groupe 8 : Les sols organiques.

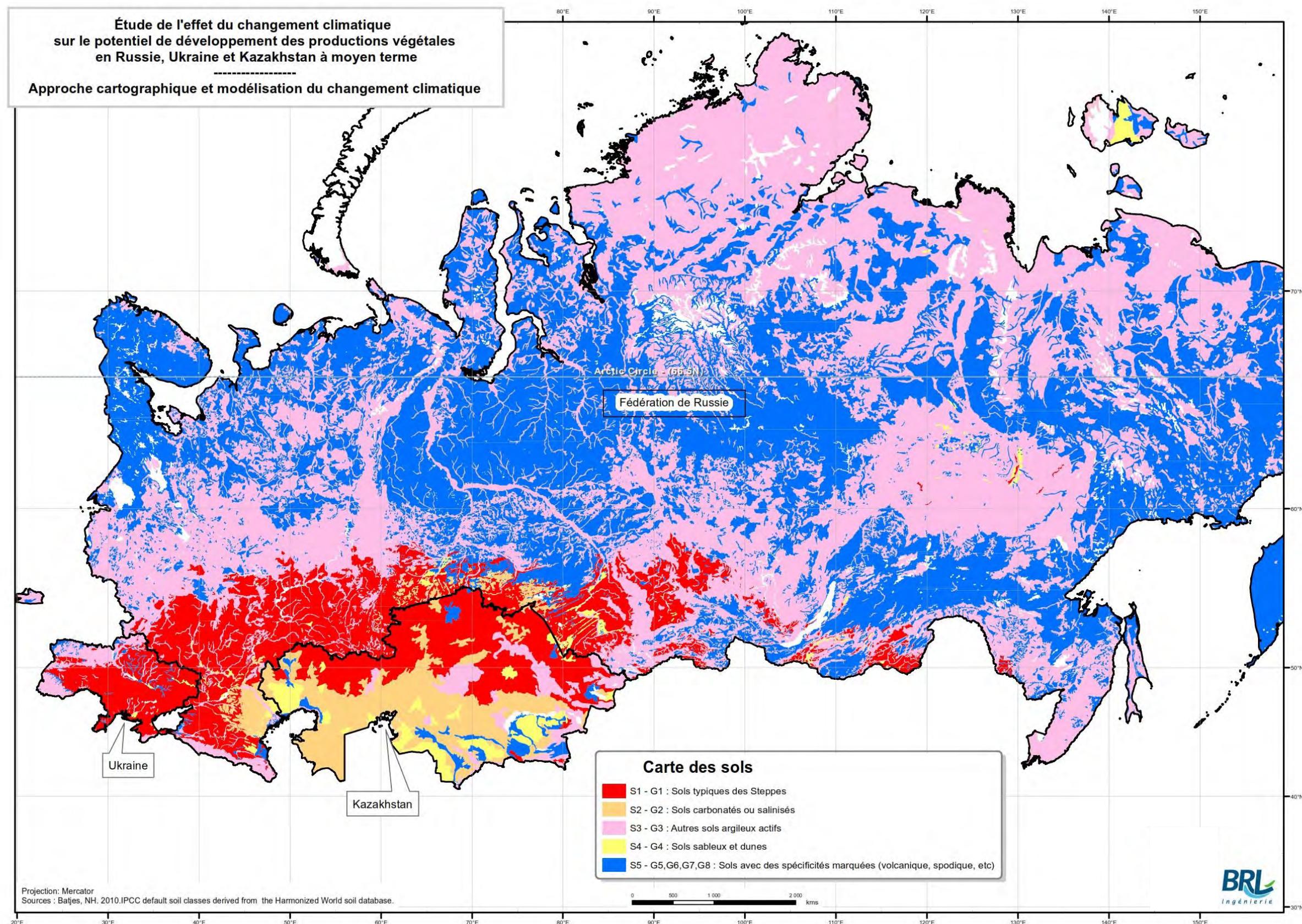
Les groupes 5, 6, 7, 8 peuvent être fusionnés car ce ne sont pas (sauf cas exceptionnels) des sols agricoles. La classification finale proposée comporte seulement 5 groupes principaux :

- ▶ S1, groupe 1, sols typiques des steppes
- ▶ S2, groupe 2, sols carbonatés ou salinisés
- ▶ S3, groupe 3, autres sols argileux actifs
- ▶ S4, groupe 4, sols sableux et dunes
- ▶ S5, groupe 5, 6, 7 et 8, sols avec des spécificités marquées (volcanique, spodique, etc.).

La carte ci-après présente la répartition géographique de ces groupes de sols dans la zone d'étude.

⁵ GIEC –IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006. GIEC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. In: Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. (Eds.), Agriculture, Forestry and Other Land Use, vol. 4. IGES, Japan. 2006

Figure 17 : Carte des sols



Les 5 grands groupes de sols retenus pour l'étude sont repris dans le tableau suivant qui précise leur aptitude culturale.

Tableau 3 : Synthèse de l'aptitude culturale des sols

Groupe de sols	Aptitude culturale
S1. Groupe 1 : Les sols typiques des Steppes	+++
S2. Groupe 2 : Les Sols carbonatés ou salinisés	+
S3. Groupe 3 : Les autres sols argileux actifs	++
S4. Groupe 4 : Sols Sableux	-
S5. Groupe des sols avec des spécificités marquées	+ ++

Légende :

+++	Forte aptitude à la mise en culture
++	Bonne aptitude à la mise en culture
+	Mise en culture possible mais présence de facteur(s) limitant(s)
-	Présence de facteur(s) limitant(s) rédhibitoire à la mise en culture

Ces aptitudes sont très différentes. Il faut noter notamment que le groupe S4 représentant les sols sableux et les dunes ne permet pas la mise en culture. Le groupe S4 conservera cette propriété même avec le climat futur puisqu'il s'agit d'une caractéristique intrinsèque du sol. Nous ne retiendrons donc pas ce sol pour les simulations.

Nous retenons ainsi au final, les sols S1, S2, S3 et S5.

2.2.4 Deux scénarios de changement climatique contrastés

On présente en Annexe :

- ▶ de manière générale, les projections climatiques fournies par la communauté scientifique ;
- ▶ un aperçu de quelques projections climatiques disponibles sur le territoire d'étude.

Il ressort les grandes idées suivantes :

- ▶ **La température va probablement augmenter sur le territoire, mais il n'est pas possible de connaître l'amplitude de cette augmentation : il est donc préférable d'étudier plusieurs scénarios d'augmentation ;**
- ▶ **En l'état des connaissances actuelles, et compte tenu de l'incertitude des modèles climatiques, nous sommes incapables de donner une projection des précipitations à l'horizon 2050 sur la zone d'étude, même en tendance.**

L'étendue du territoire d'étude, et les **très fortes incertitudes** associées aux simulations climatiques, nous ont conduits à faire les **grands choix méthodologiques suivants, pour la définition des scénarios climatiques d'étude :**

- ▶ Utilisation des projections climatiques issues du 4^{ème} rapport du GIEC (AR4, IPCC 2007), publiées par le site de la Banque Mondiale ;
- ▶ Analyse moyenne menée à l'échelle des zones climatiques définies plus haut ;
- ▶ Choix de la période de référence (conditions actuelles) : **1971-1990** ;
- ▶ Choix de l'horizon temporel (conditions futures possibles) : **2046-2065** ;

- ▶ **Choix de considérer uniquement des changements de température et ETP, compte tenu des incertitudes sur les précipitations.** Nous définissons ainsi des chroniques climatiques comme suit :
 - en « climat passé » :
 - simulations climatiques passées *issues de modèles* pour la température et l'ETP ;
 - données *historiques* pour les précipitations ;
 - en « climat futur » :
 - simulations climatiques futures *issues de modèles* pour la température et l'ETP ;
 - données *historiques* pour les précipitations (c'est-à-dire les mêmes que celles considérées pour le climat présent).
- ▶ Pour les températures et l'ETP, choix de considérer **deux projections futures pour l'ETP et les températures**, parmi l'ensemble des projections existantes :
 - **Projection climatique 1** : Scénario GES A2 modèle climatique CGCM3.1 (T47). L'évolution future de Tmax est estimée à +2.4°C à l'horizon 2065 sur la zone d'étude. « Scénario Modéré » ;
 - **Projection climatique 2** : Scénario GES A1B modèle climatique Miroc3.2 (medres). L'évolution future de Tmax est estimée à + 4.3°C à l'horizon 2065 sur la zone d'étude. « Scénario Extrême ».

Ces choix et les hypothèses associées sont détaillés en Annexe et dans le chapitre suivant.

2.3 DEUX GRANDES FAMILLES DE SIMULATIONS ONT ÉTÉ CONDUITES DANS LE CADRE DE L'ÉTUDE

Comme exposé plus haut, nous avons construit dans un premier temps deux scénarios de climat futur possibles pour lesquels nous avons considéré seulement des changements de températures, sans prendre en compte des changements possibles de précipitations, ces derniers apparaissant beaucoup trop incertains sur la zone d'étude (voir en Annexe pour les précisions).

Cette hypothèse nous a conduits à développer deux familles de simulations.

2.3.1 Famille de simulations 1 : approche systématique des évolutions possibles des rendements sur la zone RUK sous la seule hypothèse d'une évolution thermique

Cette famille de simulations utilise des **chroniques climatiques** au pas de temps mensuels.

Pour chaque simulation, on introduit dans le logiciel Aquacrop une chronique climatique (pluie, température, ETP), au pas de temps mensuels, sur plusieurs dizaines d'année (chronique 1971-1990 pour simuler la situation de référence, chronique 2046-2065 pour simuler la situation future possible).

Comme explicités plus haut, ces chroniques sont issues de l'un ou l'autre de deux modèles climatiques.

La grande spécificité de la démarche conduite dans cette famille de simulation est que nous ne faisons varier que la température et l'ETP. Les précipitations sont considérées comme sans évolution entre la situation de référence et la situation future possible.

Autrement dit, on utilise :

- ▶ En « climat passé » :
 - Les simulations climatiques passées sur 1971-1990 issues des modèles climatiques sélectionnés, pour la température et l'ETP ;
 - Les données historiques issues de la grille mondiale CRU⁶ sur 1971-1990 pour les précipitations ;
- ▶ En « climat futur » :
 - Les simulations climatiques futures sur 1971-1990 issus des modèles climatiques sélectionnés, pour la température et l'ETP ;
 - Les données historiques issues de la grille mondiale CRU sur 1971-1990 pour les précipitations (c'est-à-dire les mêmes que celles considérées pour le climat présent).

Comme vu plus haut, le choix de cette démarche est guidé par le constat que les simulations climatiques fournissent sur le territoire étudié, selon le modèle climatique utilisé, des résultats extrêmement différents sur les pluies (hausse ou baisse des précipitations selon les modèles).

En conséquence, et en résumé, les simulations de rendement réalisées qui découlent de ces chroniques climatiques ont la signification suivante :

- ▶ **Elles ne rendent pas compte des rendements historiques observés ; et elles ne rendent pas compte des rendements futurs (impossibles à simuler avec fiabilité quel que soit la méthode) ;**
- ▶ **Elles peuvent rendre compte de la sensibilité de rendements agricoles aux changements de températures et d'ETP simulés par les modèles climatiques (à précipitation constante). Il s'agit ici d'un approche en relatif, qui étudie comment une augmentation de température et d'ETP peut induire une hausse ou baisse de rendement sur les territoires d'étude.**

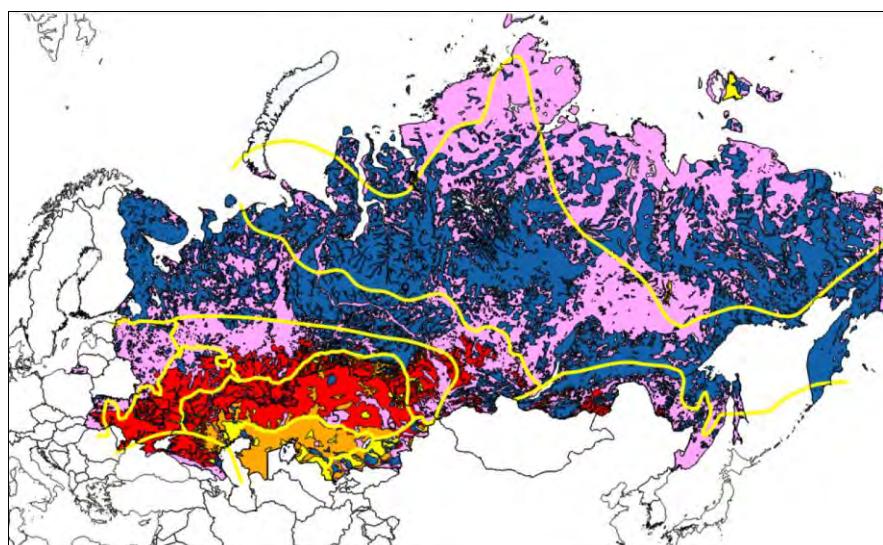
⁶ *Climatic Research Unit, University of East Anglia*

On obtient ainsi des **chroniques de rendements** (1971-1990 ou 2046-2065) sur lesquelles il est possible de calculer de multiples indicateurs (rendements moyens, nombre d'années avec un rendement inférieur à telle limite, rendement obtenu 4 années sur 5, etc) puis de faire des calculs d'évolution entre Référence et Futur.

Le grand intérêt de ces familles de simulations est de pouvoir cerner l'évolution fréquentielle des bonnes ou mauvaises années.

Nous avons conduit ces simulations de manière systématique sur la zone d'étude **en croisant les 5 types de sol avec les 12 zones climatiques de la zone d'étude** ceci afin de prendre en compte la variabilité des climats, mais aussi des sols, sur la zone d'étude.

Figure 18 : Croisement zones pédologiques x zones climatiques



Certains couples sol x climat ne présentent pas d'intérêt pour l'étude comme explicité dans la matrice suivante.

Tableau 4 : Croisement entre zone climatique et type de sol

	ZC1	ZC2	ZC3	ZC4	ZC5	ZC6	ZC7	ZC8	ZC9	ZC10	ZC11	ZC12
S1				1	2	3	4	5	6	7		
S2												
S3			8	9	10	11	12					
S4												
S5			13	14	15							

Sol ou zone climatique non retenu
 Sol minoritaire dans la ZC
 Sol non présent dans la ZC
 Croisement Sol / ZC retenu

Nous pouvons formuler les remarques suivantes concernant cette matrice :

- ▶ Les simulations concernant le groupe de sols S4, ainsi que les zones climatiques ZC1, ZC2, ZC11 et ZC12 n'ont pas été retenues (voir plus haut).
- ▶ Le type de sol S2 se retrouve pratiquement exclusivement dans la ZC11 (climat aride) que nous n'avons pas retenu pour les simulations. Au final ce type de sol n'a donc pas été modélisé ;

Ainsi les simulations de rendements avec le logiciel Aquacrop ont porté sur :

Référence/Futur x 2 scénarios de CC x 3 cultures x 15 couples sols/ZC = 180 situations

L'ensemble des simulations conduites permettent de donner des projections des rendements en blé, maïs et tournesol sur l'ensemble de la zone d'étude et donc également de produire des projections de la production pour chacune de ces cultures (avec la nécessité de faire des hypothèses fortes sur les surfaces comme on le verra).

2.3.2 Famille de simulations 2 : approche visant à cerner la sensibilité du rendement à la température ET aux précipitations

Comme déjà indiqué, nous sommes incapables de donner une projection des précipitations à l'horizon 2050 sur la zone d'étude, même en tendance.

Il est toutefois intéressant d'approcher de manière théorique un impact possible des variations de précipitations sur le rendement. Afin de compléter les simulations de la famille 1, nous avons donc conduit une étude de sensibilité du rendement aux précipitations et à la thermie.

Toujours sous Aquacrop, cet exercice a été réalisé pour la culture du blé uniquement, et dans les trois zones climatiques ZC5, ZC7 et ZC10. Le sol retenu est le sol S1.

Dans cette approche nous n'utilisons plus des chroniques climatiques, mais **nous construisons des années climatiques moyennes**. L'approche fréquentielle n'est donc plus possible mais les simulations permettent d'isoler chaque facteur, précipitation d'une part et thermie d'autre part.

Pour chacun des trois cas envisagé (blé/ZC5, blé/ZC7 et blé/ZC10), nous avons procédé comme suit :

- ▶ construction d'un climat moyen (au pas de temps mensuel) sur la zone considérée pour la pluie, la température et l'ETP : ce climat moyen a été calculé comme suit :
 - Pour la température : utilisation des données climatiques historiques CRU⁷ sur la période 1971-1990 ;
 - Pour l'ETP : calcul de l'ETP de Penman Monteith sur la base des températures de CRU et des données de CLIMWAT (source : FAO) pour les autres variables nécessaires, sur la période 1971-1990.
- ▶ simulation du rendement sous Aquacrop pour ce climat moyen,
- ▶ puis simulations en modifiant les précipitations et/ou la thermie par « pas » :
 - la température moyenne a été modifiée de - 6°C à + 6°C par tranche de 1°C ;
 - la pluviométrie moyenne a été modifiée de - 60 % à + 60 % par tranche de 15% ;
 - l'ETP a été recalculé pour chaque simulation selon la formule de Penman-Monteith en fonction de la température (les autres facteurs de la formule étant supposés constants).
- ▶ le croisement de chaque combinaison température/pluviométrie a été simulé sous Aquacrop.

Ce travail a représenté plus de 300 simulations différentes.

⁷ Climatic Research Unit, University of East Anglia

3. EVOLUTIONS POSSIBLES DES RENDEMENTS ET DE LA PRODUCTION SUR LA ZONE RUK SOUS L'INFLUENCE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Nous aborderons successivement les questions suivantes :

- Quels est l'impact possible des évolutions thermiques sur les **rendements** des cultures (blé, maïs, tournesol) de la zone RUK ?
- Quels est l'impact possible des évolutions thermiques sur la **production** des cultures (blé, maïs, tournesol) de la zone RUK ?
- Quel est la **sensibilité du rendement** du blé à des évolutions respectives des précipitations et de la thermie ?

3.1 QUELS EST L'IMPACT POSSIBLE DU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE SUR LES RENDEMENTS DES CULTURES (BLÉ, MAÏS, TOURNESOL) DE LA ZONE RUK ?

3.1.1 Impact sur le blé

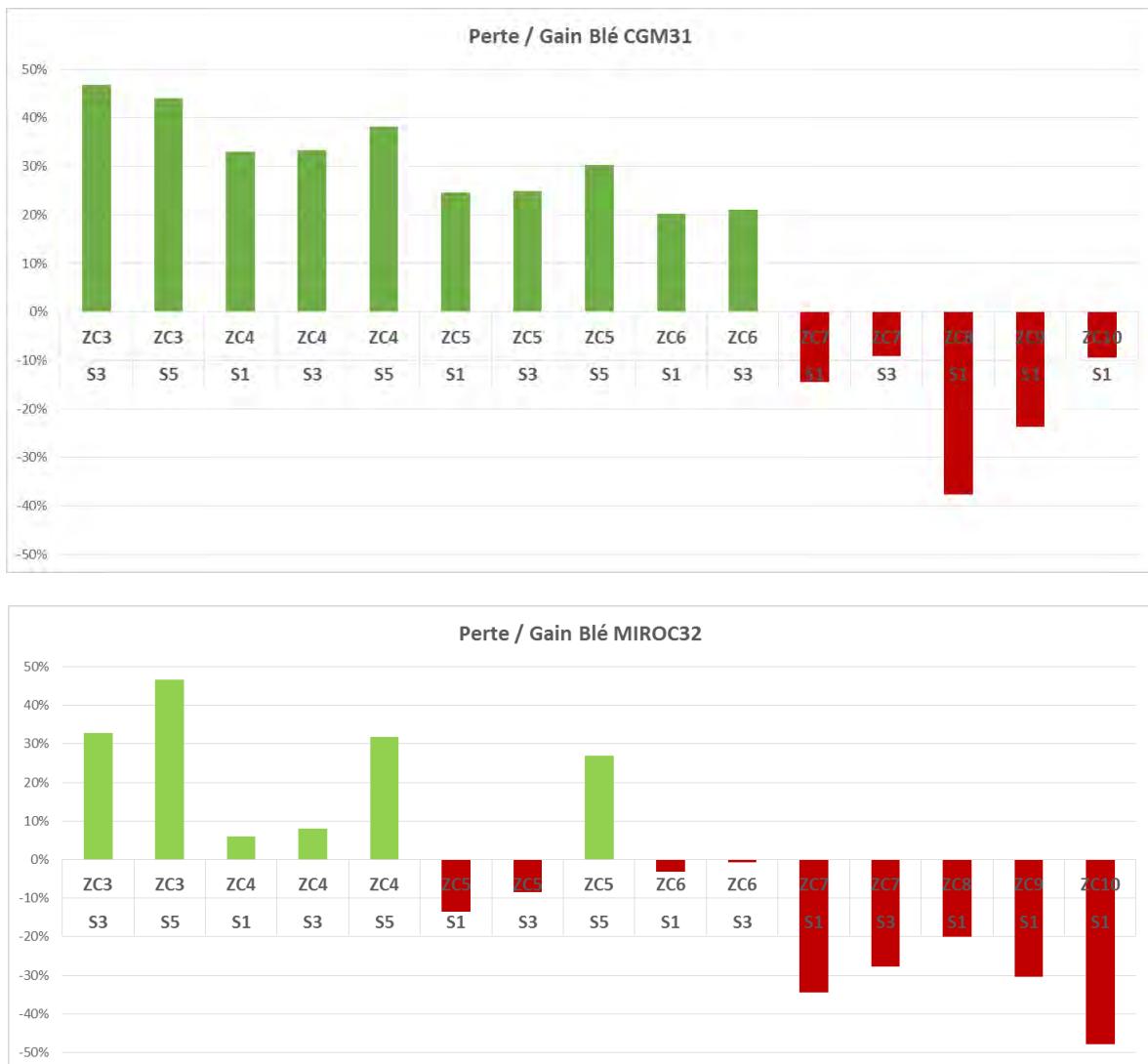
Les résultats des simulations, pour chacune des deux projections climatiques, et pour chacune des zones homogènes en terme de climat et de sol, sont présentés dans le tableau ci-dessous pour les 4 indicateurs suivants : rendement moyen, nombre d'années avec un rendement inférieur à la moyenne, nombre d'années avec un rendement inférieur à 1 t/ha et rendement atteint 4 années sur 5 (4 années sur 5 le rendement est supérieur ou égal à la valeur indiquée, 1 année sur 5 il est inférieur).

Tableau 5 : Impact possible du réchauffement climatique sur les rendements du Blé

Blé	rendement (t/ha)						Nbre années < moyenne				Nbre années < 1 t/ha				Rendement 4 années sur 5					
	Scénario Modéré			Scénario Extrême			Modéré		Extrême		Modéré		Extrême		Scénario Modéré			Scénario Extrême		
	réf	fut	delta	réf	fut	delta	réf	fut	réf	fut	réf	fut	réf	fut	réf	fut	réf	fut	réf	fut
ZC3 S3	3,0	4,4	47%	2,9	3,9	33%	10	10	11	10	0	0	0	0	3,2	4,6	44%	3,1	4,3	39%
ZC3 S5	4,0	5,8	44%	4,0	5,8	47%	9	9	10	10	0	0	0	0	4,2	5,9	41%	4,2	6,0	41%
ZC4 S1	3,1	4,2	33%	3,1	3,3	6%	10	10	8	9	0	0	0	0	3,4	4,4	31%	3,3	3,7	12%
ZC4 S3	3,2	4,2	33%	3,2	3,4	8%	10	10	8	9	0	0	0	0	3,4	4,5	33%	3,3	3,8	14%
ZC4 S5	4,2	5,8	38%	4,3	5,7	32%	10	10	9	12	0	0	0	0	4,3	6,1	40%	4,5	5,8	31%
ZC5 S1	2,7	3,4	24%	2,6	2,3	-14%	9	11	11	9	0	0	0	1	3,0	4,0	33%	2,9	2,9	-3%
ZC5 S3	2,8	3,5	25%	2,7	2,5	-9%	9	11	11	9	0	0	0	0	3,0	4,0	33%	3,0	3,0	0%
ZC5 S5	4,3	5,6	30%	4,2	5,4	27%	10	11	10	11	0	0	0	0	4,5	5,9	31%	4,4	5,5	25%
ZC6 S1	3,7	4,4	20%	3,7	3,6	-3%	8	8	9	10	0	0	0	0	4,0	5,3	32%	4,1	4,5	11%
ZC6 S3	3,7	4,5	21%	3,7	3,7	-1%	8	9	10	10	0	0	0	0	4,1	5,4	33%	4,1	4,6	11%
ZC7 S1	2,2	1,9	-15%	2,1	1,4	-34%	8	9	3	8	3	7	3	8	3,0	2,8	-4%	2,7	2,6	-4%
ZC7 S3	2,3	2,1	-9%	2,2	1,6	-28%	10	9	9	11	1	5	2	5	3,0	2,9	-3%	2,8	2,7	-3%
ZC8 S1	1,7	1,0	-38%	1,5	1,2	-20%	10	13	9	11	6	12	9	9	2,5	2,9	17%	2,5	2,1	-16%
ZC9 S1	2,4	1,8	-24%	2,2	1,5	-30%	6	8	7	9	1	8	2	7	2,7	3,1	13%	2,9	2,4	-16%
ZC10 S1	1,9	1,7	-10%	1,8	1,0	-48%	9	11	8	12	1	8	3	12	2,5	2,8	11%	2,2	1,6	-30%
total	3,0	3,6	20%	3,0	3,1	4%	9	10	9	10	1	3	1	3	3,4	4,3	27%	3,3	3,7	11%

Le graphe ci-joint reprend les résultats concernant l'évolution du rendement moyen pour chacun des deux simulations climatiques.

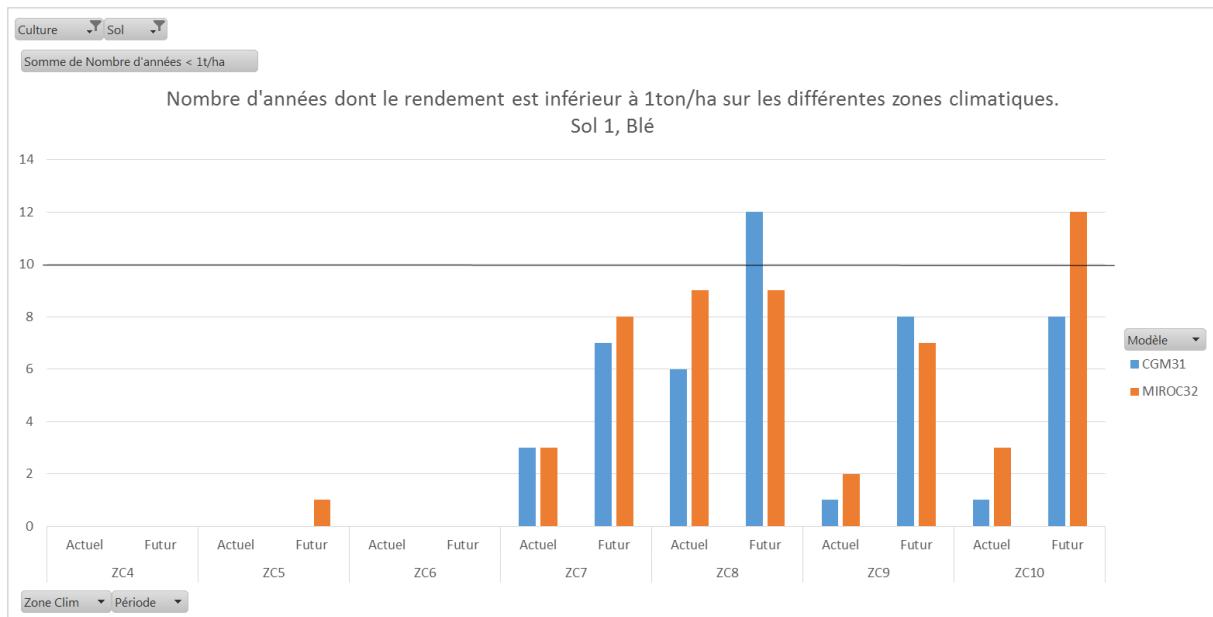
Figure 19 : Perte / gain de rendement pour la culture du blé, scénario Bas (CGM31) et scénario extrême (MIROC32)



On peut observer que :

- ▶ Les zones ZC3 à ZC6 présentent une augmentation nette du rendement quel que soit le type de sol en scénario modéré alors que les ZC7 à ZC10 montrent une baisse du rendement.
- ▶ Par contre, le passage en scénario extrême fait chuter l'ensemble de ces pourcentages quel que soit la ZC concernée. Ces baisses peuvent être suffisamment importantes pour faire basculer certaines ZC en rendement défavorable : cas de la ZC6 et de la ZC5 ;
- ▶ La ZC3 est peu impactée par le type de scénario climatique. Cette zone est très froide et donc même une augmentation forte des températures ne fait que l'adoucir ;
- ▶ Les pourcentages de baisse ou d'augmentation peuvent être forts : on observe des + 40% ou - 40% sur certaines ZC.

Le graphique ci-dessous montre le niveau d'atteinte du rendement à 1 t/ha pour les différentes ZC.

Figure 20 : Nombre d'années dont le rendement est inférieur à 1 t/ha sur les différentes ZC. Sol S1, blé.

Sur une chronique climatique de 20 ans, toutes les ZC ont un rendement moyen fortement impacté par des années à rendement très faible, mais les ZC9 et ZC10 présentent le plus fort changement.

La ZC10 présente dans le climat actuel 3 années à rendement inférieur à 1t/ha sur une chronique de 20 ans (ce qui fait partie du risque climatique habituellement subi par les agriculteurs) alors que dans le futur **ce seuil va passer à 12 années sur 20 ans ce qui ne paraît pas viable économiquement pour une exploitation agricole.**

Ci-dessous la représentation graphique de ce phénomène pour la ZC10.

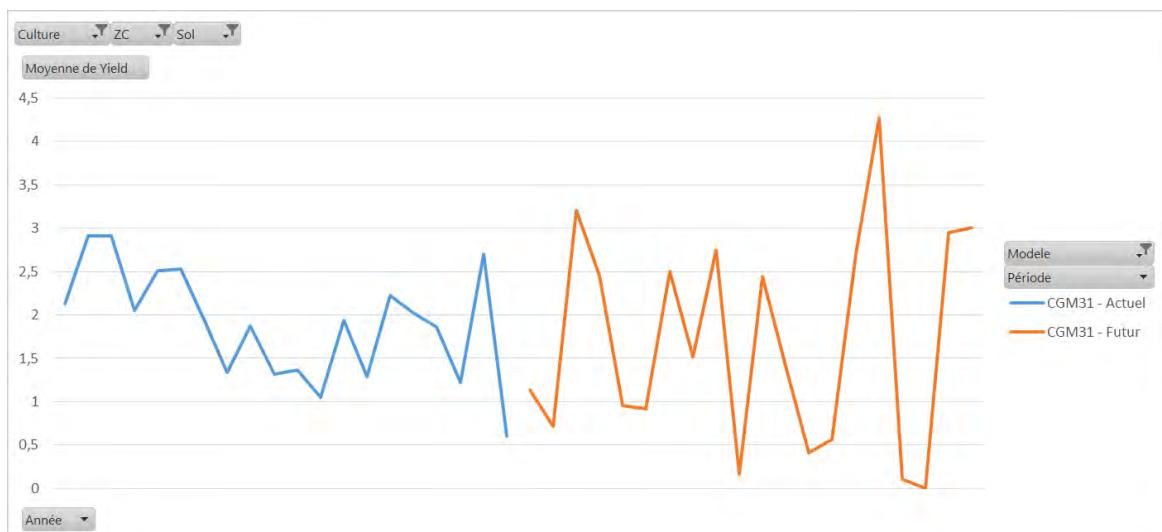
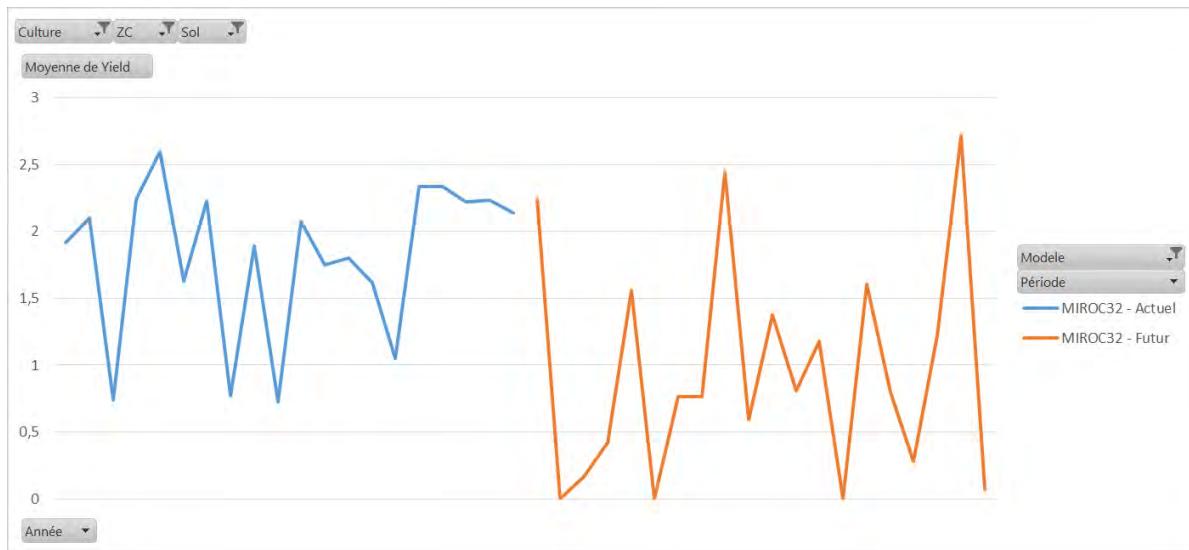
Figure 21 : Comparaison chronique de rendement actuelle et future, ZC10, S1, Blé, scénario modéré

Figure 22 : Comparaison chronique de rendement actuelle et future, ZC10, S1, Blé, scénario extrême



Synthèse pour le blé :

Le scénario climatique modéré devrait impacter faiblement le rendement moyen de l'Ukraine et de la Russie et modérément celui du Kazakhstan.

Le scénario climatique extrême devrait impacter modérément l'Ukraine, fortement la Russie et très fortement le Kazakhstan.

Dans les deux scénarios climatiques et quel que soit le pays, l'occurrence d'événement climatique extrême (chaleur extrême) va fortement augmenter, et le nombre d'année où le rendement obtenu sera nul ou presque se présentera régulièrement (jusqu'à une année sur deux dans certains cas).

3.1.2 Impact sur le maïs

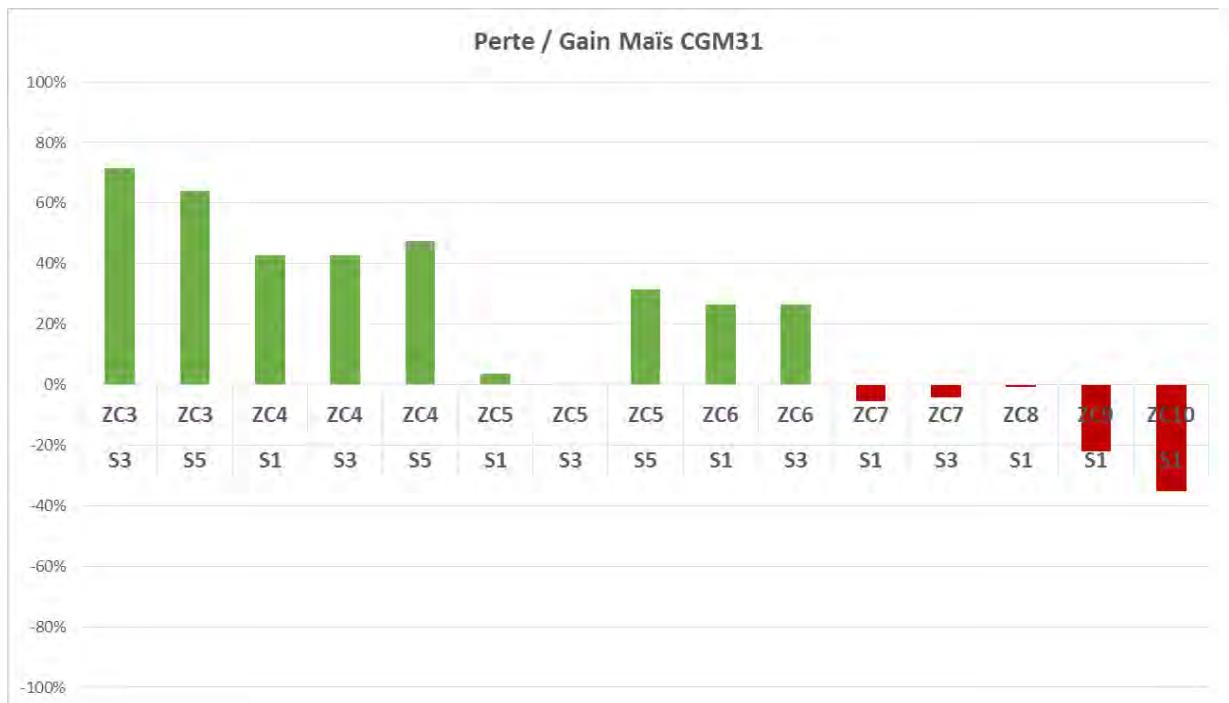
Les résultats des simulations, pour chacune des deux projections climatiques, et pour chacune des zones homogènes en terme de climat et de sol, sont présentés dans le tableau ci-dessous pour les 4 indicateurs suivants : rendement moyen, nombre d'années avec un rendement inférieur à la moyenne, nombre d'années avec un rendement inférieur à 1 t/ha et rendement atteint 4 années sur 5 (4 années sur 5 le rendement est supérieur ou égal à la valeur indiquée, 1 année sur 5 il est inférieur).

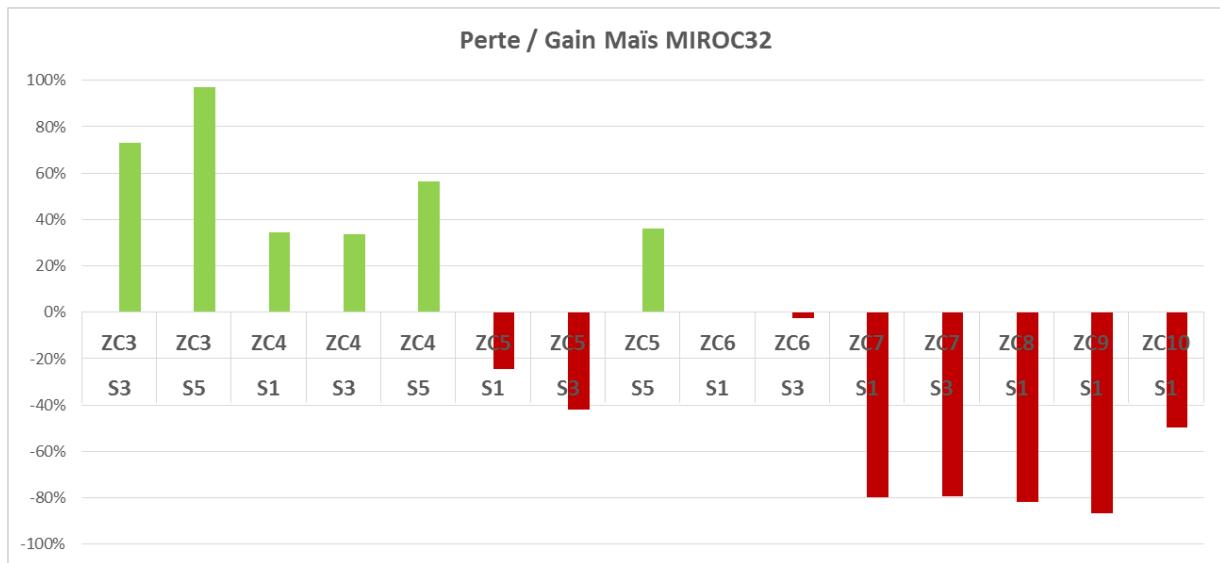
Tableau 6 : Impact possible du réchauffement climatique sur les rendements du Maïs

Maïs	rendement (t/ha)						Nbre années < moyenne				Nbre années < 3 t/ha				Rendement 4 années sur 5							
	Scénario Modéré			Scénario Extrême			Modéré		Extrême		Modéré		Extrême		Scénario Modéré			Scénario Extrême				
	réf	fut	delta	réf	fut	delta	réf	fut	réf	fut	réf	fut	réf	fut	réf	fut	réf	fut	réf	fut		
	ZC3	S3	72%	5,3	9,2	72%	5,06	8,76	73%	9	11	7	9	0	0	1	0	5,9	9,7	65%	5,9	9,4
ZC3	S5	64%	6,8	11,1	64%	6,52	12,9	97%	9	12	8	7	0	0	1	0	8,0	11,9	49%	7,7	13,6	76%
ZC4	S1	43%	7,9	11,3	43%	8,17	11	34%	11	10	10	7	0	0	0	0	8,6	11,7	36%	8,9	11,5	29%
ZC4	S3	43%	7,9	11,2	43%	8,16	10,9	34%	11	10	10	7	0	0	0	0	8,6	11,7	36%	8,9	11,4	28%
ZC4	S5	47%	8,2	12,1	47%	8,51	13,3	56%	11	11	9	8	0	0	0	0	9,2	12,8	39%	9,4	13,9	48%
ZC5	S1	4%	5,9	6,1	4%	5,9	4,45	-25%	5	8	8	8	3	6	1	8	7,2	9,4	31%	6,8	6,6	-3%
ZC5	S3	0%	5,4	5,4	0%	5,08	2,96	-42%	5	8	6	14	4	8	4	14	6,9	8,9	29%	6,6	5,4	-18%
ZC5	S5	31%	10,4	13,7	31%	10,6	14,4	36%	7	9	10	6	0	0	0	0	11,3	14,3	27%	11,7	14,7	26%
ZC6	S1	26%	9,9	12,5	26%	10,2	10,2	0%	9	9	8	7	0	0	0	0	10,6	13,3	25%	11,0	12,2	10%
ZC6	S3	26%	9,7	12,3	26%	10	9,79	-2%	10	9	8	7	0	0	0	1	10,6	13,3	26%	10,9	11,9	9%
ZC7	S1	-5%	5,5	5,2	-5%	5,18	1,05	-80%	10	10	9	12	6	9	6	19	9,1	9,4	3%	7,9	1,5	-81%
ZC7	S3	-4%	4,7	4,5	-4%	4,34	0,89	-79%	12	11	11	13	9	11	9	19	8,7	8,5	-3%	7,2	1,3	-83%
ZC8	S1	-1%	1,5	1,5	-1%	1,05	0,19	-82%	14	14	15	15	17	17	18	20	2,0	3,0	48%	1,3	0,3	-80%
ZC9	S1	-22%	1,8	1,4	-22%	1,4	0,19	-86%	14	14	11	13	16	18	18	20	2,7	2,3	-14%	2,0	0,3	-87%
ZC10	S1	-36%	1,1	0,7	-36%	0,73	0,37	-49%	15	16	14	16	17	18	19	20	1,2	0,9	-31%	1,0	0,4	-60%
total		28%	6,1	7,9	28%	6,06	6,75	11%	10	11	10	10	5	6	5	8	7,4	9,4	27%	7,1	7,6	6%

Le graphe ci-joint reprend les résultats concernant l'évolution du rendement moyen pour chacun des deux simulations climatiques.

Figure 23 : Perte / gain de rendement pour la culture du maïs, scénario modéré (CGM31) et scénario extrême (MIROC32)

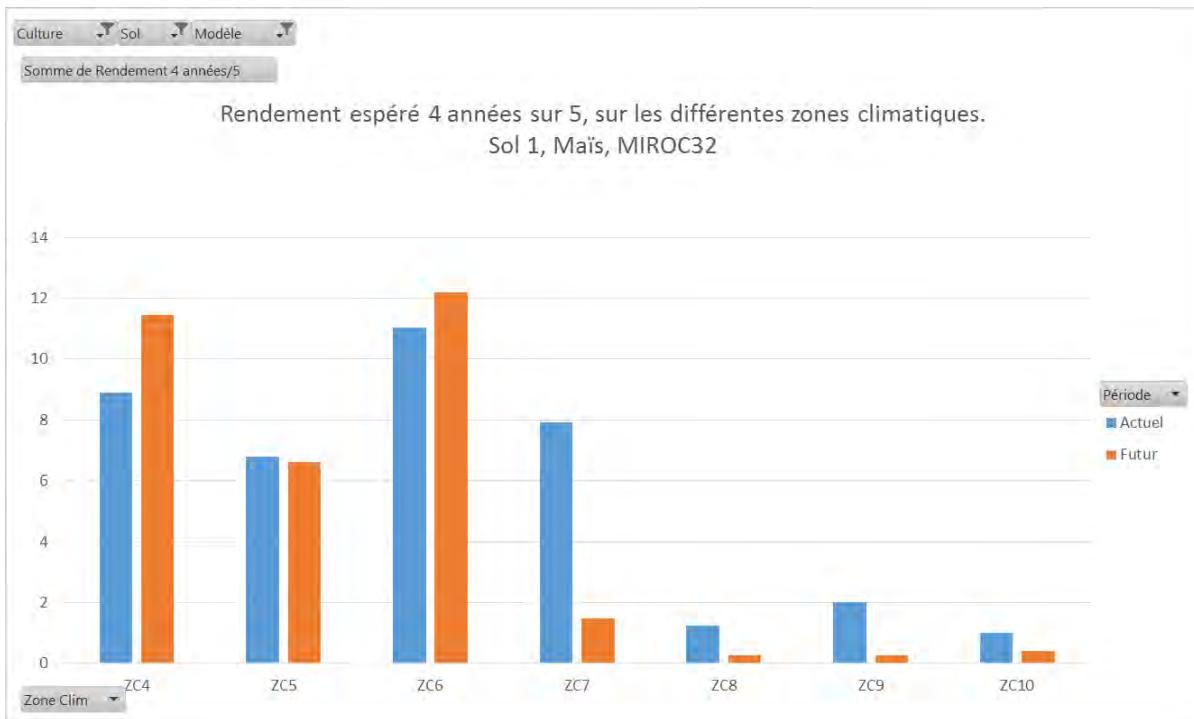




On peut observer que :

- ▶ En scénario modéré, les zones ZC3 à ZC6 présentent une augmentation nette du rendement quel que soit le type de sol, les ZC7 et ZC8 ne changent pas significativement, et les ZC9 et ZC10 montrent une baisse du rendement.
- ▶ Le passage en scénario extrême engendre des réactions de la plante très différentes selon la ZC :
 - Le rendement augmente sur la ZC3. Cette zone étant excessivement froide, toute augmentation de température ne peut qu'améliorer ce rendement ;
 - Il n'y a pas de changement significatif entre les 2 scénarios climatiques pour ZC4 ;
 - Le rendement diminue sur la ZC5 sauf sur le sol S5 qui présente une meilleure réserve utile (RU) donc une meilleure résistance au stress hydrique ;
 - Toutes les autres ZC sont impactées négativement.
- ▶ Les pourcentages de baisse ou d'augmentation peuvent être forts : on observe des + 80% ou - 80% sur certaines ZC.

La dégradation du rendement espéré 4 années sur 5 est très différente d'une ZC à l'autre comme le montre l'histogramme ci-dessous.

Figure 24 : Rendement espéré 4 années sur 5 par ZC, sol S1, Maïs, scénario extrême

Les ZC4, ZC4 et ZC6 présentent de bons niveaux de rendement et le conserveront même avec le scénario extrême.

La ZC7 a un bon niveau de rendement en climat actuel et sera très fortement affectée par le scénario extrême.

Les ZC8, ZC9 et ZC10 avaient un mauvais niveau de rendement en climat actuel et auront un rendement proche de zéro en scénario extrême.

Ci-dessous la représentation graphique de la chronique de rendement pour la ZC7.

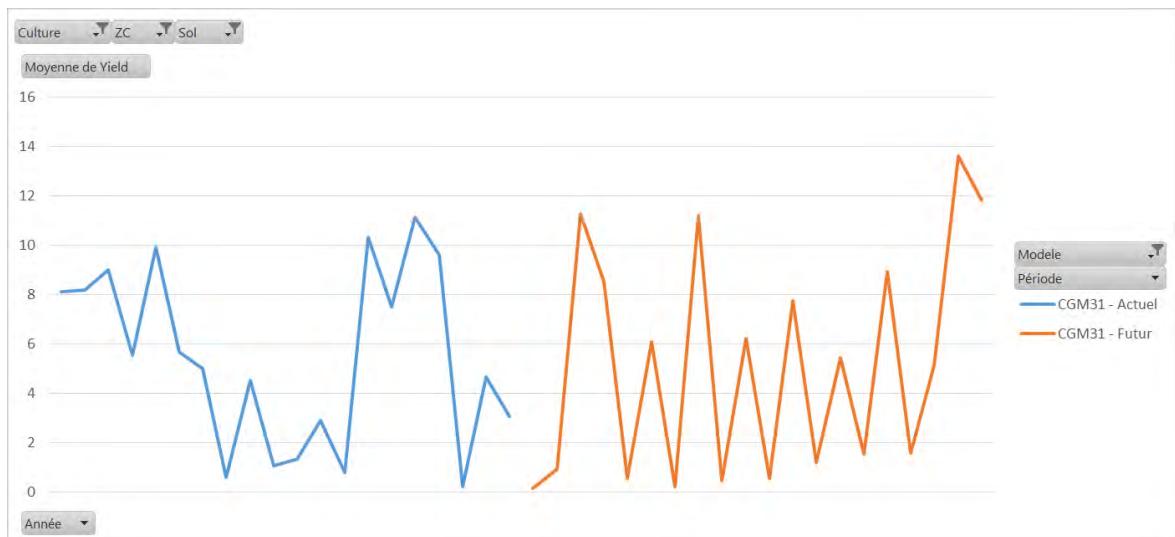
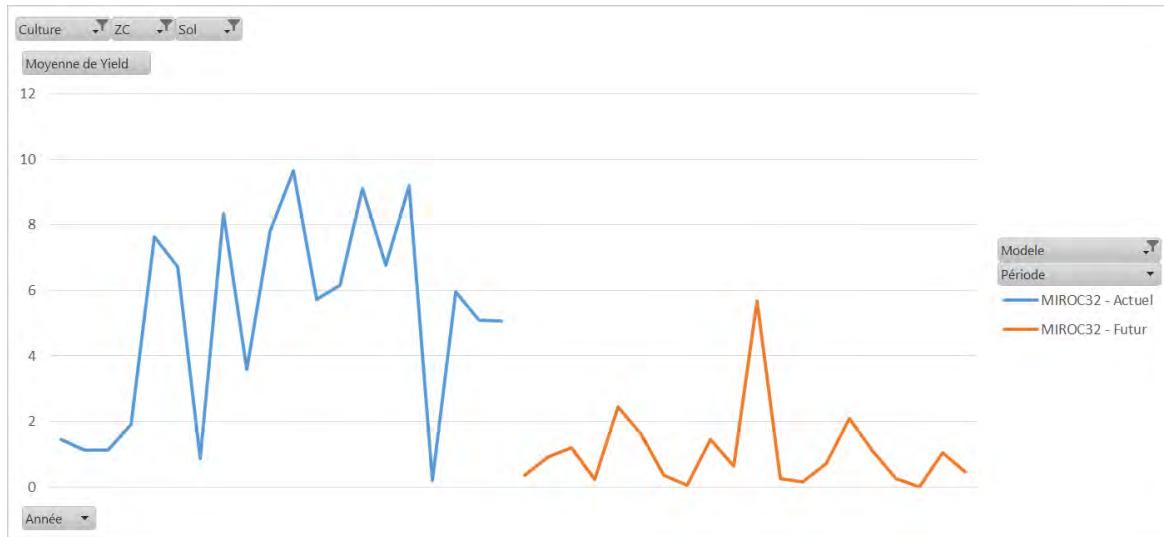
Figure 25 : Comparaison chronique de rendement actuelle et future, ZC7, S1, Maïs, CGM31

Figure 26 : Comparaison chronique de rendement actuelle et future, ZC7, S1, Maïs, MIROC32

Synthèse pour le maïs :

Le scénario climatique modéré ne devrait pas impacter le rendement moyen de l'Ukraine, voire il pourrait l'améliorer. Ce scénario devrait impacter faiblement le rendement moyen de la Russie et celui du Kazakhstan.

Dans tous les scénarios climatiques le Kazakhstan (ZC10) présente un rendement simulé proche de zéro. Le climat est fortement défavorable à la culture du maïs sans irrigation.

Le scénario climatique extrême devrait impacter fortement l'Ukraine (ZC7), fortement la Russie et très fortement le Kazakhstan.

Dans les deux scénarios climatiques et quel que soit le pays, l'occurrence d'événement climatique extrême (chaleur extrême) va fortement augmenter et le nombre d'année où le rendement obtenu sera nul ou presque se présentera régulièrement.

3.1.3 Impact sur le tournesol

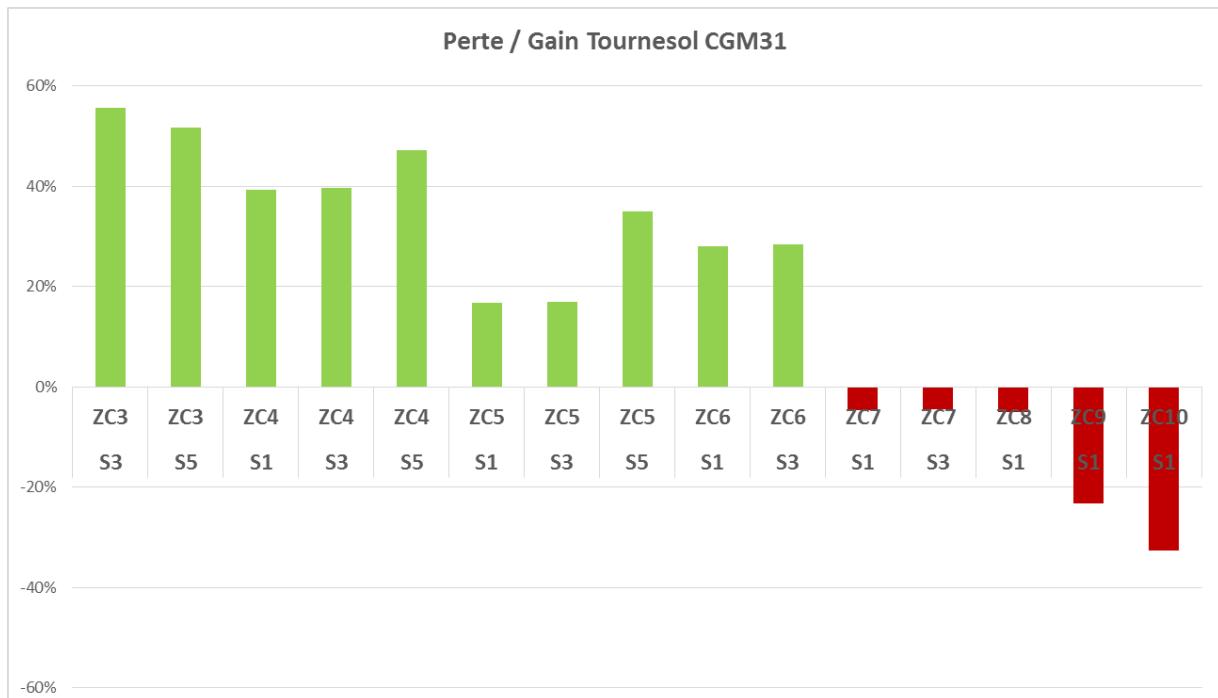
Les résultats des simulations, pour chacune des deux projections climatiques, et pour chacune des zones homogènes en terme de climat et de sol, sont présentés dans le tableau ci-dessous pour les 4 indicateurs suivants : rendement moyen, nombre d'années avec un rendement inférieur à la moyenne, nombre d'années avec un rendement inférieur à 1 t/ha et rendement atteint 4 années sur 5 (4 années sur 5 le rendement est supérieur ou égal à la valeur indiquée, 1 année sur 5 il est inférieur).

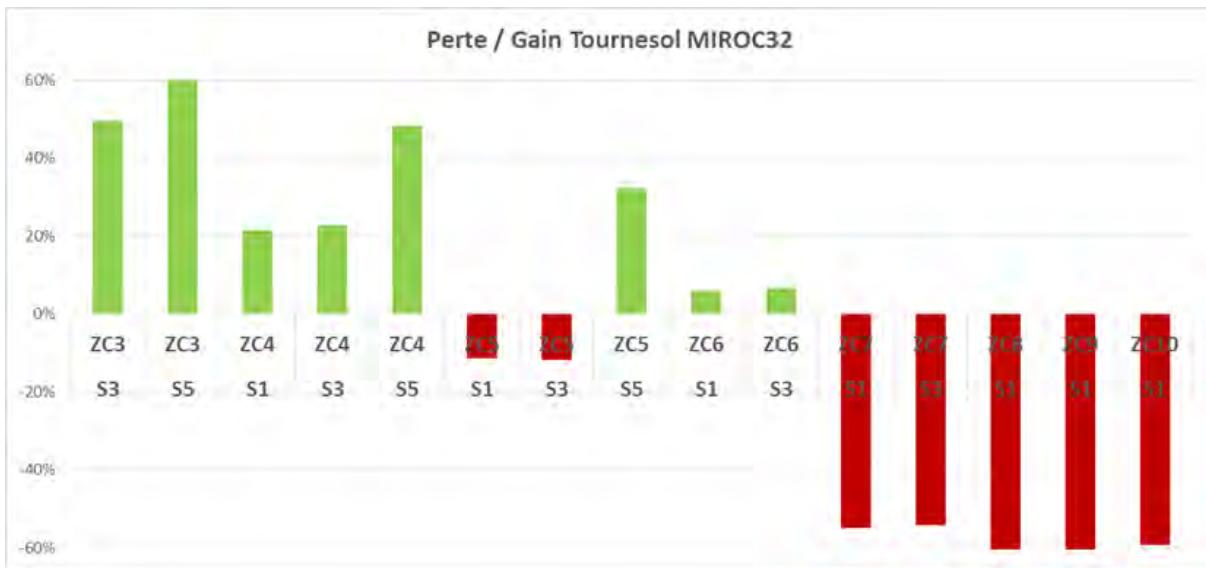
Tableau 7 : Impact possible du réchauffement climatique sur les rendements du Tournesol

Tournesol	rendement (t/ha)						Nbre années < moyenne				Nbre années < 1 t/ha				Rendement 4 années sur 5					
	Scénario Modéré			Scénario Extrême			Modéré		Extrême		Modéré		Extrême		Scénario Modéré			Scénario Extrême		
	réf	fut	delta	réf	fut	delta	réf	fut	réf	fut	réf	fut	réf	fut	delta	réf	fut	delta	réf	fut
ZC3 S3	2,19	3,41	56%	2,12	3,17	50%	10	11	9	10	0	0	1	0	2,28	3,54	55%	2,34	3,36	44%
ZC3 S5	2,82	4,28	52%	2,78	4,52	63%	10	9	9	8	0	0	1	0	3,02	4,49	49%	3,13	4,62	48%
ZC4 S1	2,57	3,58	39%	2,6	3,16	22%	9	9	11	10	0	0	0	0	2,67	3,78	42%	2,73	3,33	22%
ZC4 S3	2,58	3,61	40%	2,61	3,2	23%	9	9	11	10	0	0	0	0	2,69	3,8	41%	2,75	3,36	22%
ZC4 S5	3,02	4,44	47%	3,11	4,61	48%	10	10	9	8	0	0	0	0	3,29	4,63	41%	3,27	4,7	44%
ZC5 S1	2,12	2,47	17%	2,13	1,89	-11%	6	8	8	8	1	2	0	6	2,45	3,22	31%	2,34	2,54	9%
ZC5 S3	2,11	2,47	17%	2,13	1,88	-12%	6	8	8	8	1	3	0	6	2,46	3,24	32%	2,34	2,55	9%
ZC5 S5	3,31	4,46	35%	3,32	4,39	32%	11	10	10	10	0	0	0	0	3,38	4,56	35%	3,43	4,46	30%
ZC6 S1	3,02	3,87	28%	3	3,18	6%	9	10	9	9	0	0	0	0	3,21	4,44	38%	3,17	3,61	14%
ZC6 S3	3,03	3,89	28%	3,01	3,21	7%	10	10	9	9	0	0	0	0	3,2	4,45	39%	3,18	3,62	14%
ZC7 S1	1,98	1,89	-5%	1,93	0,87	-55%	9	9	8	13	1	7	2	13	2,54	3,16	24%	2,34	2,01	-14%
ZC7 S3	1,98	1,89	-5%	1,9	0,87	-54%	8	9	7	12	1	7	3	13	2,55	3,2	25%	2,35	1,93	-18%
ZC8 S1	0,83	0,79	-5%	0,7	0,16	-77%	14	14	14	16	14	14	15	19	1,91	1,91	0%	1,27	0,16	-87%
ZC9 S1	1,45	1,11	-23%	1,33	0,17	-87%	10	11	8	12	6	10	8	20	2,11	2,2	4%	1,99	0,25	-87%
ZC10 S1	0,86	0,58	-33%	0,66	0,27	-59%	12	16	11	16	13	16	14	19	1,5	0,77	-49%	1,28	0,27	-79%
total	2,26	2,85	26%	2,22	2,37	7%	10	10	9	11	2	4	3	6	2,62	3,43	31%	2,53	2,72	8%

Le graphe ci-joint reprend les résultats concernant l'évolution du rendement moyen pour chacun des deux simulations climatiques.

Figure 27 : Perte / gain de rendement pour la culture du tournesol, scénario modéré (CGM31) et scénario extrême (MIROC32)



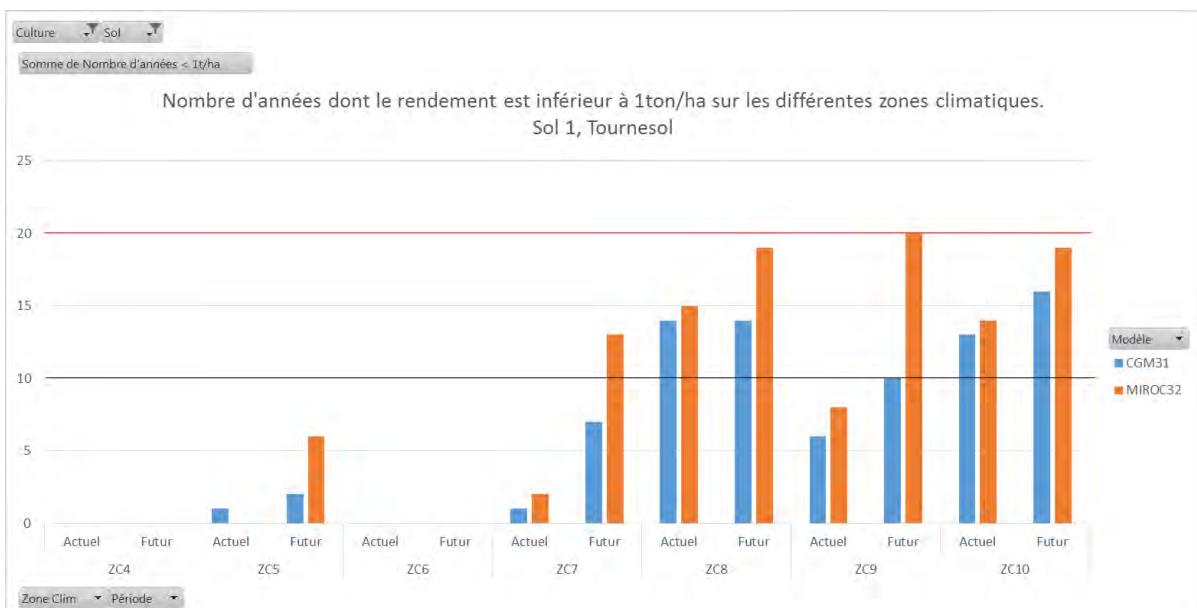


Les deux histogrammes ci-dessus montrent le pourcentage de perte ou de gain de rendement entre le climat présent et le climat futur en fonction des ZC, des sols et des 2 projections climatiques. On peut observer que :

- En scénario modéré, les zones ZC3 à ZC6 présentent une augmentation nette du rendement quel que soit le type de sol, les ZC7 et ZC8 sont stables, alors que les ZC9 et ZC10 montrent une baisse du rendement ;
- Par contre, le passage en scénario extrême fait chuter fortement l'ensemble de ces pourcentages quel que soit la ZC concernée ;
- Les pourcentages de baisse ou d'augmentation peuvent être forts : on observe des + 60% ou - 60% sur certaines ZC.

Le graphique ci-dessous montre le niveau d'atteinte du rendement à 1 t/ha pour les différentes ZC.

Figure 28 : Nombre d'années dont le rendement est inférieur à 1 t/ha sur les différentes ZC. Sol S1, tournesol.



Sur une chronique climatique de 20 ans, toutes les ZC ont un rendement moyen fortement impacté par des années à rendement très faible, mais les ZC7, ZC9 et ZC10 présentent le plus fort changement.

La ZC7 présente, dans le climat actuel et le scénario extrême, 2 années à rendement inférieur à 1t/ha sur une chronique de 20 ans (ce qui représente un risque climatique faible subi par les agriculteurs) alors que dans le futur **ce seuil va passer à 13 années sur 20 ans ce qui ne paraît pas viable économiquement pour une exploitation agricole.**

Ci-dessous la représentation graphique de ce phénomène pour la ZC7.

Figure 29 : Comparaison chronique de rendement actuelle et future, ZC7, S1, Tournesol, CGM31

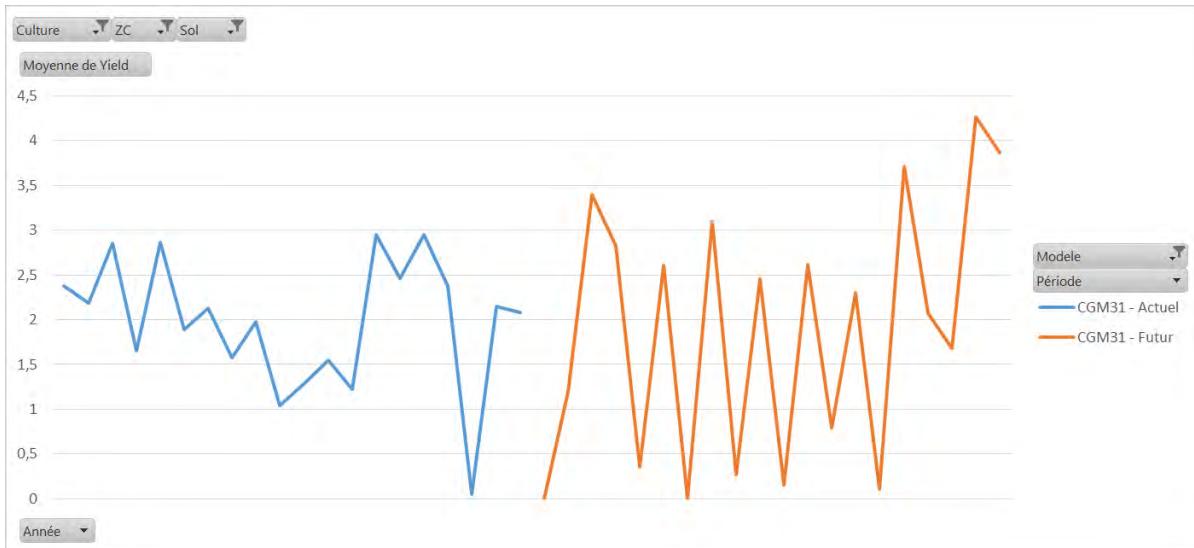
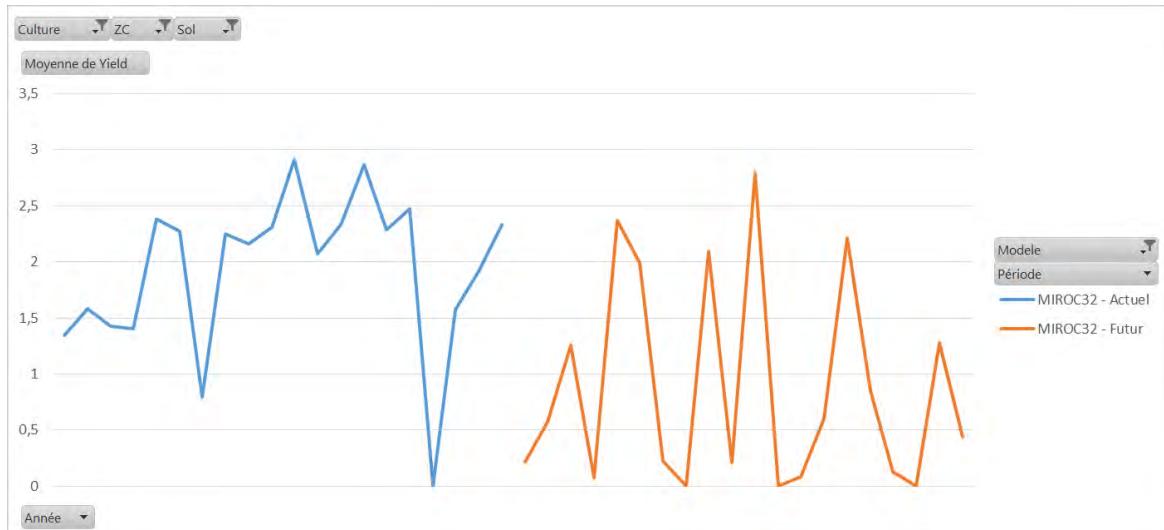


Figure 30 : Comparaison chronique de rendement actuelle et future, ZC7, S1, Tournesol, MIROC32



Synthèse pour le tournesol :

Si l'on considère l'ensemble de la zone d'étude, quel que soit le scénario climatique retenu, le rendement moyen devrait rester stable, voire augmenter.

Le scénario climatique modéré devrait être favorable au rendement moyen de l'Ukraine, plutôt défavorable à celui de la Russie et fortement défavorable pour celui du Kazakhstan.

Le scénario climatique extrême devrait impacter très fortement l'Ukraine et avoir un impact majeur sur le marché mondial, ce pays étant le premier exportateur mondial d'huile de tournesol.

L'impact du scénario extrême sera également fort pour la Russie et le Kazakhstan.

Dans les deux scénarios climatiques et quel que soit le pays, l'occurrence d'événement climatique extrême (chaleur extrême) va fortement augmenter, et le nombre d'année où le rendement obtenu sera nul ou presque se présentera régulièrement.

3.1.4 Synthèse sur le facteur pédologique : Comment réagissent les rendements au réchauffement du climat pour les différents types de sol ?

Les histogrammes suivants présentent l'évolution du rendement moyen du blé par type de sol entre les deux scénarios climatiques toutes ZC confondues.

Figure 31 : Evolution du rendement du blé en fonction du type de sol, scénario modéré, toutes ZC confondues

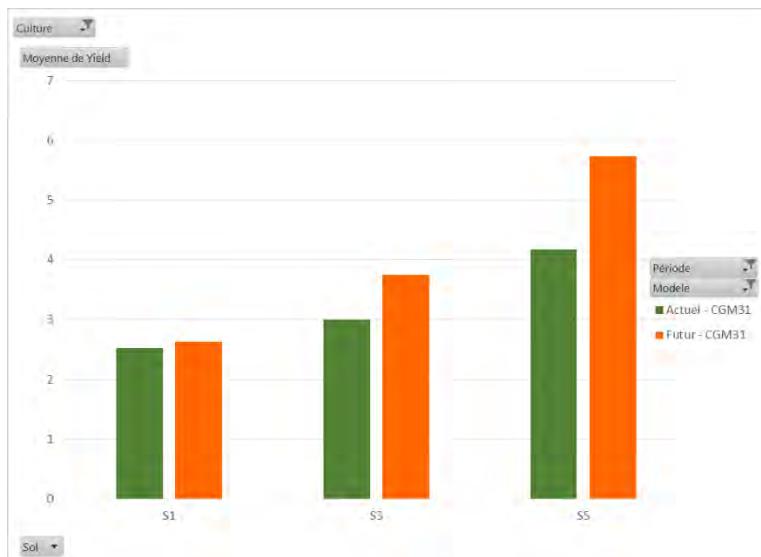
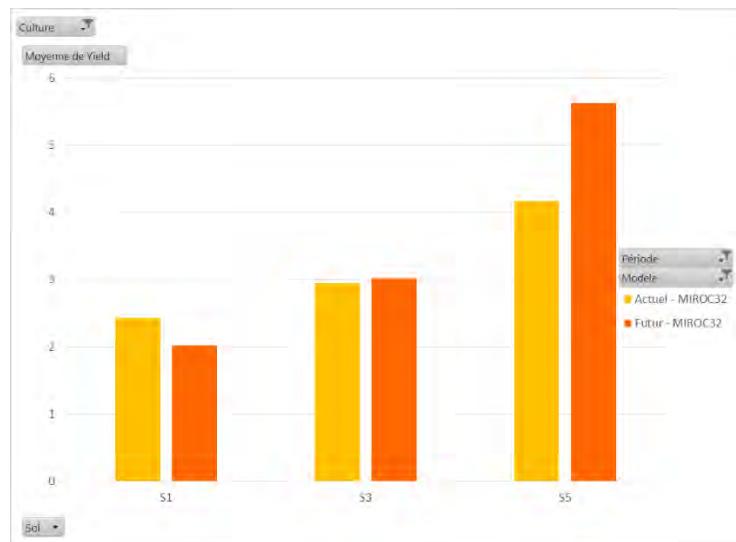


Figure 32 : Evolution du rendement du blé en fonction du type de sol, scénario extrême, toutes ZC confondues



On observe que le type de sol S1 « sol typique des steppes » correspondant en grande majorité aux tchernozems donne le rendement le plus faible en comparaison de S3 et S5 quel que soit le scénario climatique. Ce résultat peut paraître surprenant mais il est en fait cohérent avec la logique de modélisation d'Aquacrop qui se base uniquement sur un bilan hydrique des sols. Or comme présenté dans le tableau suivant le type de sol S1 présente la réserve utile (RU) la plus faible.

Tableau 8 : Réserve Utile (RU) par type de sol utilisée pour le paramétrage d'Aquacrop

Réserve Utile (RU) mm/m Horizon 0-50cm	
S1	143
S2	133
S3	152
S4	-
S5	245

La fertilité intrinsèque des sols n'est pas prise en compte dans Aquacrop et donc sur le seul paramètre de quantité d'eau stockée dans le profil cultural, c'est le sol S5 qui est le plus favorable à la croissance des cultures.

Dans le scénario climatique modéré, il n'y a pas de différence significative pour le type de sol S1 entre le rendement actuel et le rendement futur. Par contre pour les sols S3 et S5, il y a une augmentation importante du rendement à l'horizon 2045.

Dans le scénario climatique extrême, on observe une baisse de rendement sur le sol S1, une stabilité sur S3 et une augmentation sur S5.

Ces résultats sont en fait à relativiser car les sols S3 et S5 se trouvent dans les zones climatiques ZC1, ZC2 et ZC3. Or ZC1 et ZC2 correspondent à des climats trop froids où la culture du blé ne se fait pas. Seule la zone ZC3 à un intérêt car ces résultats montrent que la limite nord de culture du blé est susceptible de se déplacer encore plus au nord dans le futur en cultivant les sols S5 de cette zone.

3.2 QUELS EST L'IMPACT POSSIBLE DU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE SUR LA PRODUCTION DES CULTURES (BLÉ, MAÏS, TOURNESOL) DE LA ZONE RUK ?

3.2.1 Les limites de l'exercice

L'exercice consistant à utiliser un rendement modélisé pour estimer une production en la multipliant par une surface cultivée est particulièrement périlleux pour les raisons suivantes :

- ▶ Les surfaces cultivées en jeu sont immenses. Elles se comptent en millions d'hectares. Une erreur de quelques centaines de milliers d'hectares sur la surface cultivée va engendrer une différence de production qui chiffrera en millions de tonnes. Les conclusions que l'on pourra tirer pourront être diamétralement opposées.
- ▶ Les rendements calculés à l'aide du modèle de croissance sont des rendements potentiels. Ils ne correspondent pas à des rendements moyens. Le rendement potentiel d'une zone peut être de 8 T/ha, mais le rendement moyen obtenu par les agriculteurs pourra être de 5 T/ha car les parcelles ne bénéficient pas forcément de l'itinéraire technique idéal permettant d'atteindre le rendement potentiel.
- ▶ La détermination des surfaces cultivées futures est très délicate tant le nombre de paramètres pouvant l'influencer est grand.

L'addition des quelques biais que nous venons de mentionner engendre une incertitude énorme sur le résultat calculé. Afin d'apporter du sens à cet exercice nous proposons de travailler sur la base de 2 hypothèses :

3.2.2 A surface cultivées constantes, quelle serait la production agricole avec les rendements futurs influencés par le réchauffement climatique ?

Dans un premier temps, il est intéressant de ne regarder que l'effet du climat sur la croissance végétale. Compte-tenu du changement des conditions climatiques, les cultures vont être affectées parfois de manière positive et parfois de manière négative. Quel est l'effet de ce seul paramètre sur la production agricole ? Si la surface cultivée n'évolue pas, le changement climatique affectera-t-il de manière positive ou négative la production agricole ?

Pour répondre à cette question nous avons appliqué les nouveaux rendements issus des simulations de croissance à la surface actuellement cultivée.

L'intérêt de cette première hypothèse est de connaître l'effet du seul paramètre « changement climatique ». Cette hypothèse permet de connaître la balance entre les gains et les pertes de surfaces/production. Elle permet d'apporter des éléments de réponse à la question « Quel est l'impact du changement climatique sur la zone concernée si l'agriculture se maintient tel quel est aujourd'hui ? ».

Les surfaces considérées pour la production actuelle et future sont celles issues du système mondial de zones agroécologiques (GAEZ) dont les données datent de 2000. **Nous n'avons pas pu identifier de source de donnée plus récente permettant d'avoir les données à l'échelle des 3 pays avec une définition suffisante (pixel de 1 km²).**

CAS DU BLÉ

Les données GAEZ donnent une surface totale en blé pour la zone RUK de 41 millions d'hectares. Les données FAOstat, pour cette même année, donnent 36,5 millions d'hectares soit une différence d'environ 10% que nous avons considérée comme acceptable.

Pour chaque ZC, la surface en blé a été calculée par traitement SIG, puis multipliée par le rendement calculé par le modèle de croissance, ce qui donne une production calculée par ZC. Pour chacun des deux modèles, plutôt que de raisonner en production absolue, nous avons attribué l'indice 100 à la somme des productions des différentes ZC en climat de référence.

Le tableau ci-dessous présente les résultats obtenus :

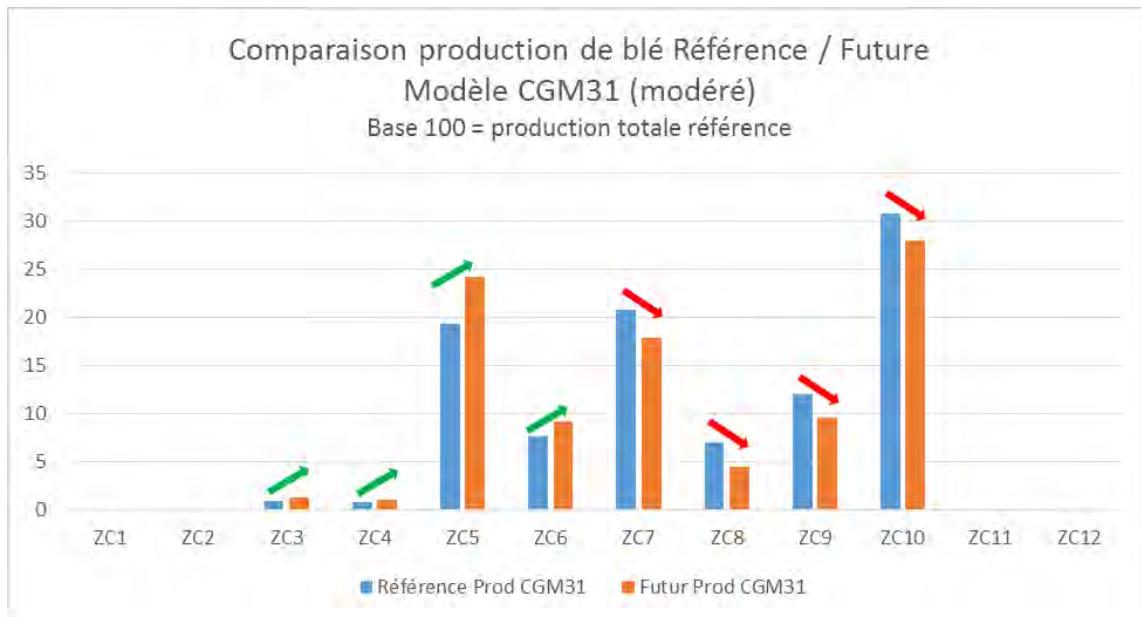
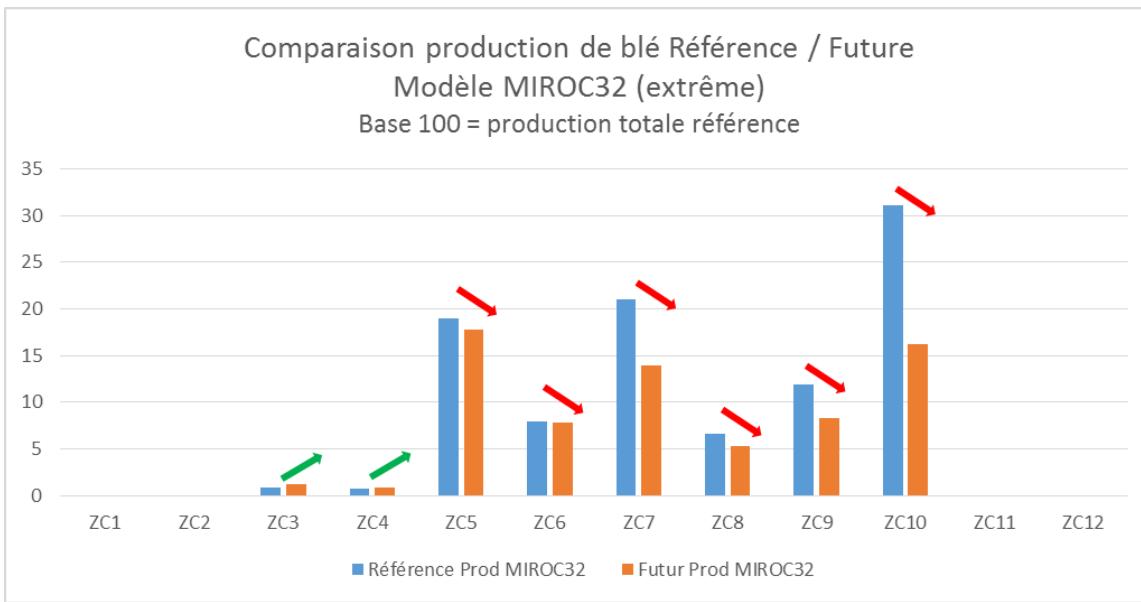
Tableau 9 : Comparaison production de référence (base 100) et future pour le blé (hypothèse 1: surface constante)

	Modèle modéré (CGM31)		Modèle extrême (MIROC32)	
	Production de référence (base 100)	Production Future	Production de référence (base 100)	Production Future
ZC1	0	0	0	0
ZC2	0	0	0	0
ZC3	1	1	1	1
ZC4	1	1	1	1
ZC5	19	24	19	18
ZC6	8	9	8	8
ZC7	21	18	21	14
ZC8	7	4	7	5
ZC9	12	10	12	8
ZC10	31	28	31	16
ZC11	0	0	0	0
ZC12	0	0	0	0
	100	96	100	71

Le scénario de changement climatique modéré (modèle climatique CGM31) fait baisser la production totale de 4%. **Ce changement est modeste et l'on peut considérer que l'impact d'une augmentation de la température moyenne d'environ 2°C serait peu impactant pour la culture du blé de façon globale.** On peut également remarquer que les ZC en limite de zone de production de blé (ZC3, ZC4 et particulièrement ZC5) seraient même positivement impactées par ce réchauffement.

Le scénario de changement climatique extrême (modèle climatique MIROC32) fait baisser la production totale de 29%. **Ce changement est important et l'on peut considérer que, sous les hypothèses considérées, l'impact d'une augmentation de la température moyenne d'environ 4,5°C engendrerait une baisse de production de l'ordre de 30%.** Même la zone ZC5, dont le facteur limitant est le froid, serait négativement impactée. Certaines ZC, notamment la ZC10, serait très fortement impactée avec une baisse de près de 50%.

Les graphiques ci-dessous présentent pour les deux scénarios de changement climatique la production par ZC.

Figure 33 : Scénario modéré, impact sur la production de bléFigure 34 : Scénario extrême, impact sur la production de blé

CAS DU MAÏS

Les données GAEZ donnent une surface totale en maïs pour la zone RUK de 2,86 millions d'hectares. Les données FAOstat, pour cette même année, donnent 2,07 millions d'hectares, soit une différence d'environ 25% que nous avons considérée comme acceptable.

Pour chaque ZC la surface en maïs a été calculée par traitement SIG, puis multipliée par le rendement calculé par le modèle de croissance ce qui donne une production calculée par ZC. Pour chacun des deux modèles, plutôt que de raisonner en production absolue, nous avons attribué l'indice 100 à la somme des productions des différentes ZC en climat de référence.

Le tableau ci-dessous présente les résultats obtenus :

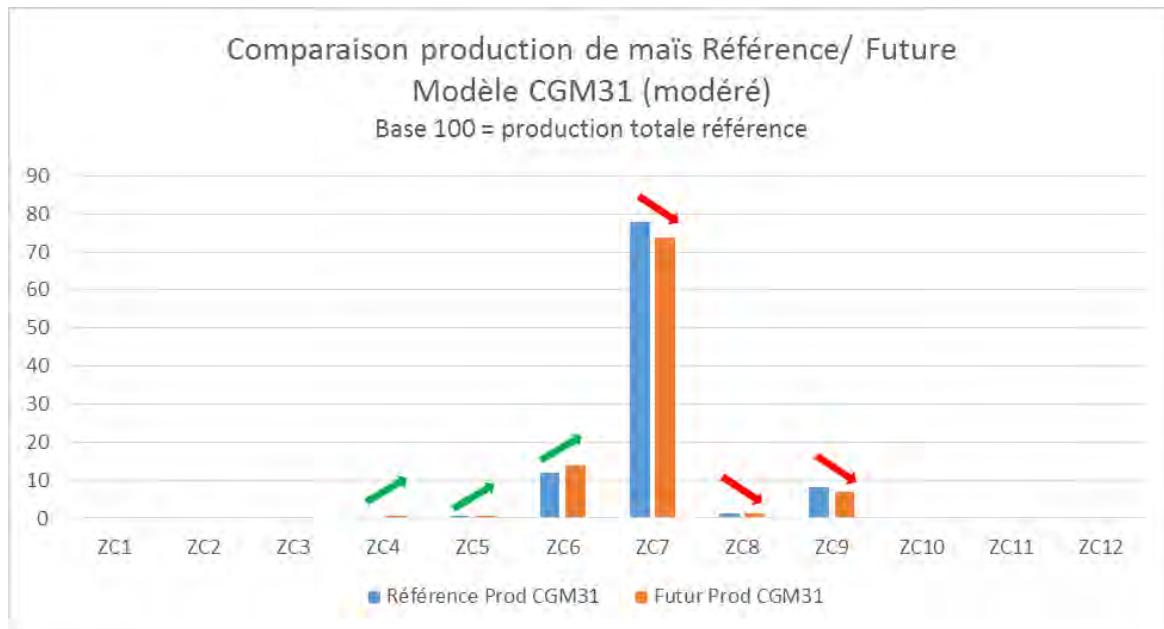
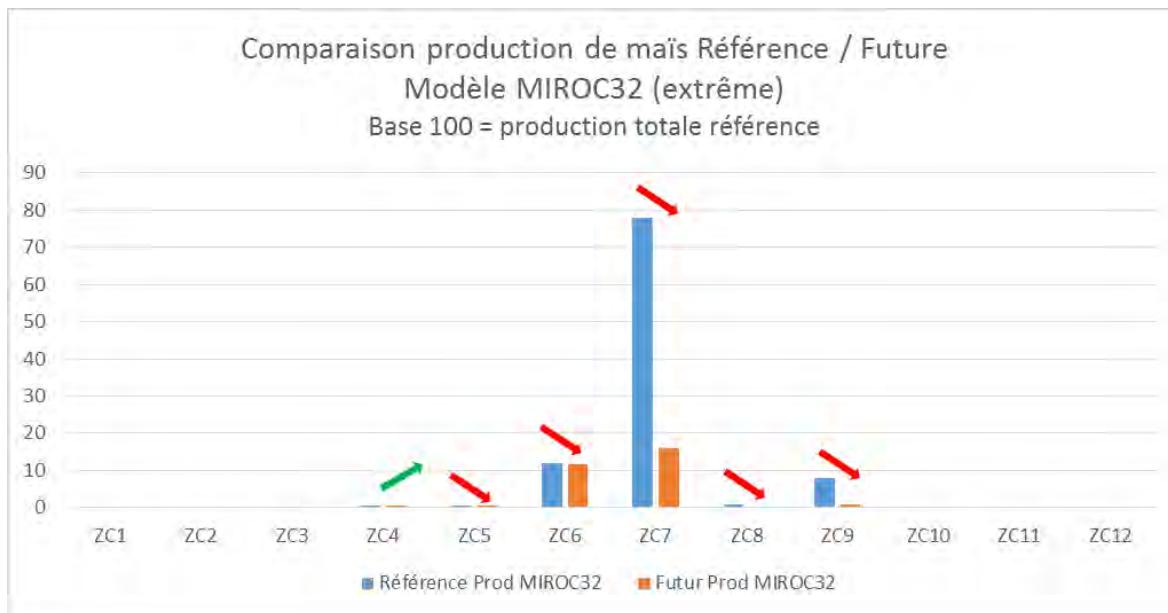
Tableau 10 : Comparaison production de référence (base 100) et future pour le maïs (hypothèse 1 : surface constante)

	Modèle modéré (CGM31)		Modèle extrême (MIROC32)	
	Production de référence (base 100)	Production Future	Production de référence (base 100)	Production Future
ZC1	0	0	0	0
ZC2	0	0	0	0
ZC3	0	0	0	0
ZC4	0	1	0	1
ZC5	1	1	1	0
ZC6	12	14	12	12
ZC7	78	74	78	16
ZC8	1	1	1	0
ZC9	8	7	8	1
ZC10	0	0	0	0
ZC11	0	0	0	0
ZC12	0	0	0	0
	100	97	100	30

Le scénario de changement climatique modéré représenté par le modèle climatique CGM31 fait baisser la production totale de 3 %. **Ce changement est négligeable et l'on peut considérer que l'impact d'une augmentation de la température moyenne d'environ 2°C n'impacterait pas la culture du maïs de façon globale.**

Le scénario de changement climatique extrême représenté par le modèle climatique MIROC32 fait baisser très fortement la production totale. **Ce changement est drastique et l'on peut considérer que l'impact d'une augmentation de la température moyenne d'environ 4,5°C engendrerait une donc une baisse de la production, de l'ordre de 70% avec les hypothèses retenues !** D'après les données GAEZ, la majeure partie de la production est concentrée dans la ZC7, or cette ZC est fortement impactée par le scénario extrême ce qui se répercute directement sur la production totale.

Les graphiques ci-dessous présentent pour les deux scénarios de CC la production par ZC.

Figure 35 : Scénario modéré, impact sur la production de maïsFigure 36 : Scénario extrême, impact sur la production de maïs

CAS DU TOURNESOL

Les données GAEZ donnent une surface totale en tournesol pour la zone RUK de 9,4 millions d'hectares. Les données FAOstat, pour cette même année, donnent 7,4 millions d'hectares soit une différence d'environ 20% que nous avons considérée comme acceptable.

Pour chaque ZC la surface en tournesol a été calculée par traitement SIG, puis multipliée par le rendement calculé par le modèle de croissance ce qui donne une production calculée par ZC. Pour chacun des deux modèles, plutôt que de raisonner en production absolue, nous avons attribué l'indice 100 à la somme des productions des différentes ZC en climat de référence.

Le tableau ci-dessous présente les résultats obtenus :

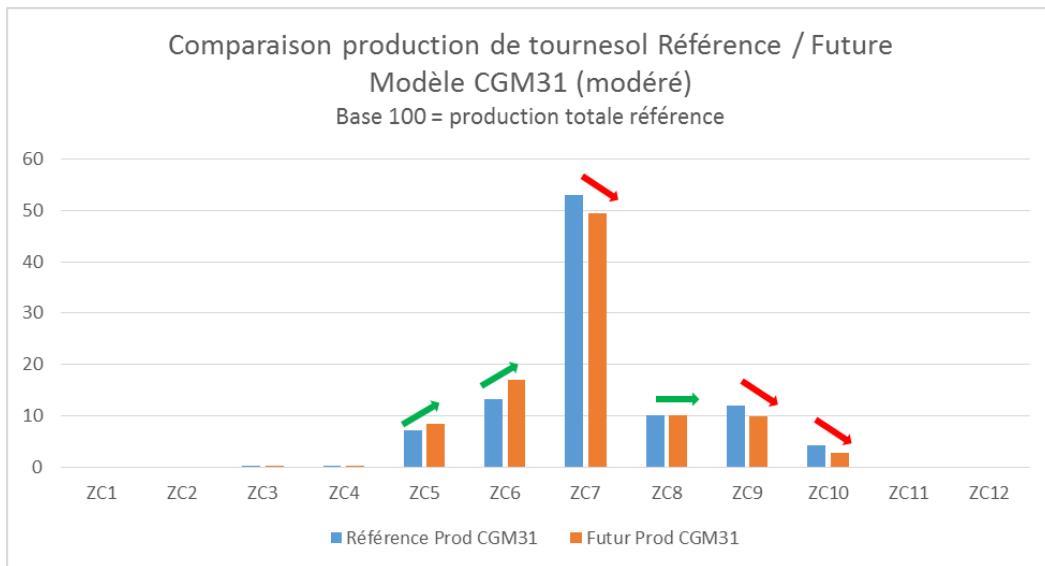
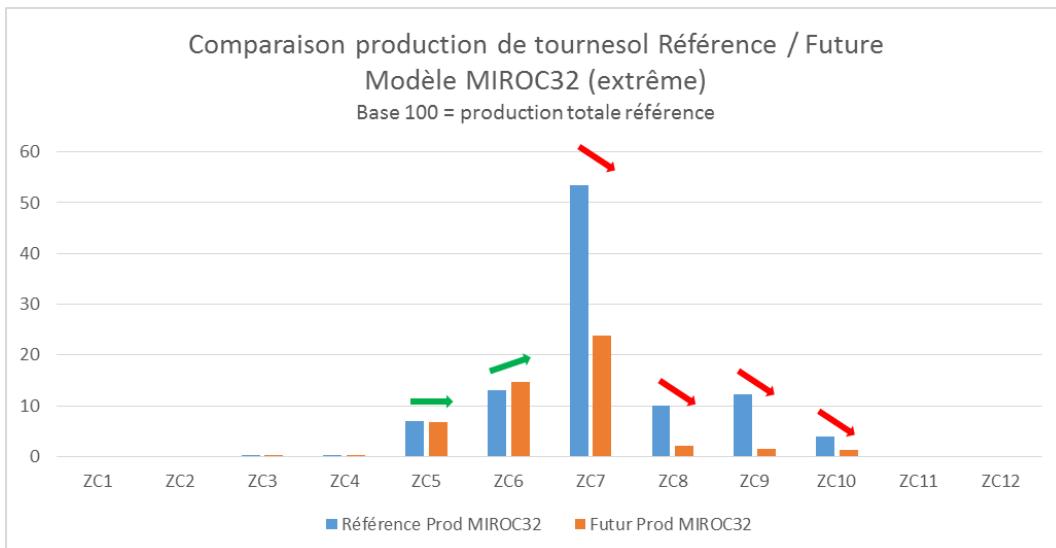
Tableau 11 : Comparaison production de référence (base 100) et future pour le tournesol (hypothèse 1 : surface constante)

	Modèle modéré (CGM31)		Modèle extrême (MIROC32)	
	Production de référence (base 100)	Production Future	Production de référence (base 100)	Production Future
ZC1	0	0	0	0
ZC2	0	0	0	0
ZC3	0	0	0	0
ZC4	0	0	0	0
ZC5	7	8	7	7
ZC6	13	17	13	15
ZC7	53	49	53	24
ZC8	10	10	10	2
ZC9	12	10	12	2
ZC10	4	3	4	1
ZC11	0	0	0	0
ZC12	0	0	0	0
	100	97	100	50

Le scénario de changement climatique modéré représenté par le modèle climatique CGM31 fait baisser la production totale de 3 %. **Ce changement est négligeable et l'on peut considérer que l'impact d'une augmentation de la température moyenne d'environ 2°C n'impactera pas la culture du tournesol de façon globale.**

Le scénario de changement climatique extrême représenté par le modèle climatique MIROC32 fait baisser la production totale de manière très notable. **On peut considérer que l'impact d'une augmentation de la température moyenne d'environ 4,5°C engendrerait ainsi une baisse de production d'environ 50% sous les hypothèses retenues !** D'après les données GAEZ, la majeure partie de la production est concentrée dans la ZC7, or cette ZC est fortement impactée par le scénario extrême ce qui se répercute directement sur la production totale.

Les graphiques ci-dessous présentent pour les deux scénarios de CC la production par ZC.

Figure 37 : Scénario modéré, impact sur la production de tournesolFigure 38 : Scénario extrême, impact sur la production de tournesol

3.2.3 Comment pourraient évoluer les surfaces cultivées, et donc la production, sous l'influence du réchauffement climatique ?

L'hypothèse précédente faisait le postulat que les surfaces cultivées resteraient les mêmes dans le futur. Ce postulat permet d'apporter des éléments de compréhension sur l'impact du changement climatique mais il ne reflète pas la réalité. Les surfaces cultivées seront bien sûr amenées à évoluer d'ici 2015.

Se pose alors la question de l'influence de la variation de cette surface cultivée sur la production en considérant les rendements calculés futurs. Une zone climatique dont le rendement pourrait chuter dans le futur, pourrait-elle compenser cette perte par une augmentation des surfaces cultivées et vice versa ? La perte globale de production que l'on met en évidence dans le scénario climatique extrême, pourrait-elle être compensée par une modification des surfaces cultivées de certaines zones climatiques ?

La réponse à cette problématique pose deux questions méthodologiques :

- ▶ Comment connaître les surfaces cultivées à l'horizon 2046-2065 ? Le nombre de paramètres qui influence la progression ou la diminution des surfaces cultivées est très important. Ces paramètres peuvent être d'ordre technique, sociologique, économique, politique, logistique, ...
- ▶ Nous avons montré que les conditions de culture pourront s'améliorer dans des zones climatiques qui sont faiblement ou pas du tout cultivées aujourd'hui. Comment connaître l'augmentation des surfaces cultivées dans de telles zones où aucune référence n'existe ?

Remarque :

Une première solution, qui n'a pas pu être réalisée dans le cadre de la présente étude, pourrait être la suivante pour aborder ces questions. Cette approche vise à cerner la dynamique historique de progression des surfaces cultivées pour la projeter dans le futur. Pour cela, il s'agirait de comparer différentes images d'occupation du sol à différents pas de temps (images obtenues à partir de l'analyse d'images satellites). Les changements d'occupation du sol des terres entre deux années successives pourraient alors être mis en évidence : défrichage d'une forêt pour mise en culture, ou à l'inverse passage d'une surface cultivée à de la friche. En sommant les surfaces ayant changé de statut et en les ramenant à la surface totale cultivée, on pourrait déterminer un coefficient de mise en culture. Ce coefficient pourrait alors être appliqué sous certaines conditions aux surfaces actuelles pour déterminer les surfaces futures possibles.

Les principales bases de données d'occupation du sol au niveau mondial qui pourraient être utilisées pour un tel exercice sont les suivantes :

- ▶ Global land Cover Characterization (GLCC) : USGS, 1992-93, 1 km de résolution,
- ▶ Global Land Cover Network (GLCN) : FAO, 2014, 1 km de résolution,
- ▶ Global Cover : ESA, 2005-2009/10, 300 m de résolution,
- ▶ Global Land Cover 2000 (GLC 2000) : UE, 2000, 1 km de résolution.

Les classes d'occupation des sols sont à peu près similaires. Si plusieurs sources différentes de base de données sont utilisées, un travail d'uniformisation sera à prévoir.

Pour l'analyse diachronique des surfaces en cultures / forêts, les années suivantes peuvent être comparées : 1993, 2000, 2005, 2009 et 2014.

3.3 QUELLE EST LA SENSIBILITÉ DU BLÉ À L'AUGMENTATION OU À LA BAISSE DE LA TEMPÉRATURE ET DE LA PLUVIOMÉTRIE ?

Il est apparu intéressant de s'interroger sur la sensibilité du modèle de croissance Aquacrop à modéliser la croissance de la culture du blé en fonction des modifications de la température et des précipitations.

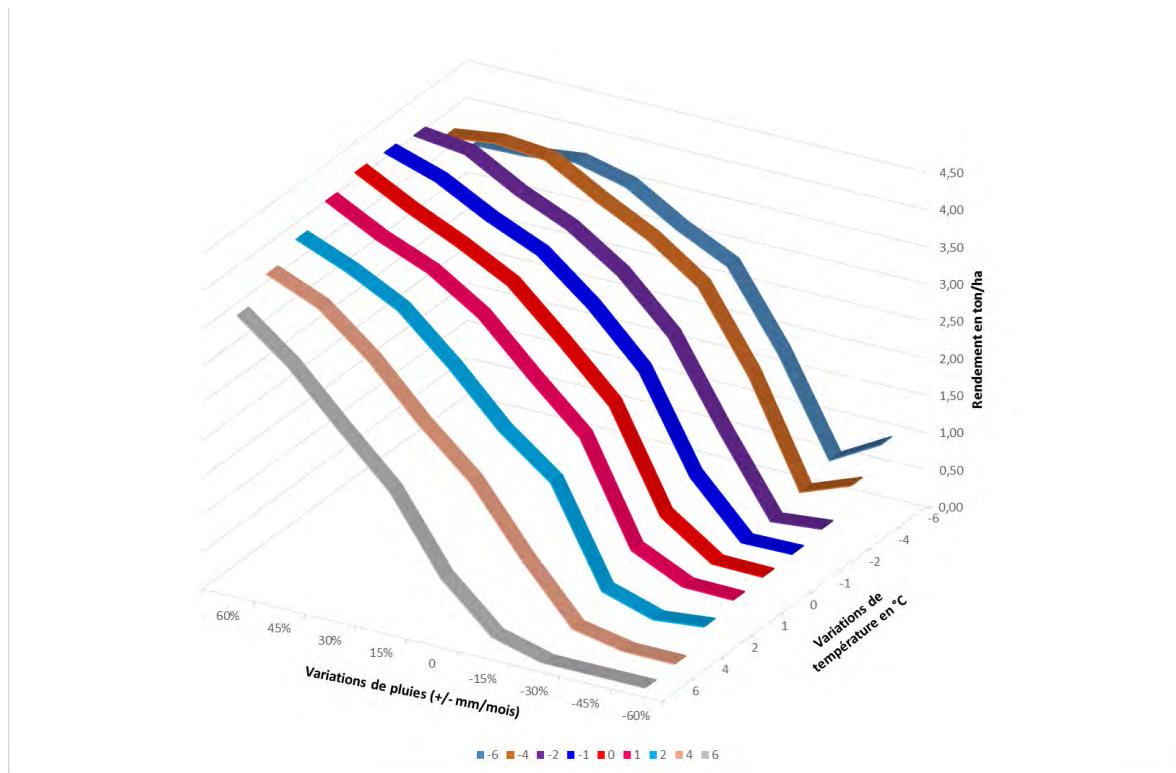
Quelle est l'amplitude de température et/ou de pluie nécessaire pour qu'un impact soit ressenti sur la croissance du blé ? Pour répondre à cette question nous nous sommes focalisés sur un type de sol (S1) et 3 zones climatiques (ZC5, ZC6 et ZC10). Il n'était pas envisageable de traiter l'ensemble des types de sol et des ZC compte-tenu du nombre de simulations que cela aurait nécessité. De nouveaux climats ont été créés en partant du climat initial de la ZC auquel il a été ajouté ou retiré une quantité de pluie et/ou de température. Plus ou moins 6°C pour la température moyenne, par tranche de 1°C, et plus ou moins 60% de pluviométrie moyenne pour les précipitations, par tranche de 15%. Pour chacune de ces multiples combinaisons climatiques, nous avons recalculé une valeur d'ETP en utilisant la formule de Penman-Monteith afin de pouvoir paramétriser le logiciel Aquacrop et lancer les simulations pour la culture du blé.

CAS DE LA ZC10

Les résultats présentés ici concernent la ZC10 avec le sol S1.

Le graphique 3D ci-dessous présente le résultat des simulations de croissance.

Figure 39 : Graphique 3D, impact pluie/température sur le blé



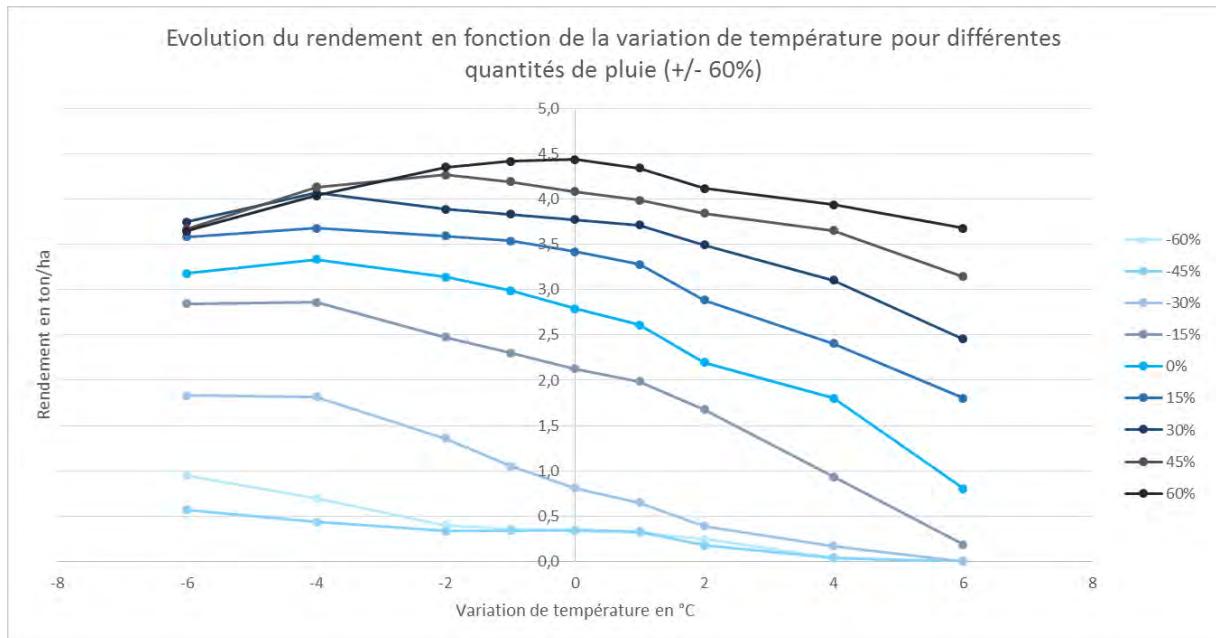
Ce graphique un peu complexe montre :

- Une influence importante de la variation de la pluviométrie sur le niveau de rendement. La pente des courbes selon l'axe des pluies est importante.
- Un impact plus modéré mais significatif cependant des variations de température qui doivent atteindre des niveaux élevés pour que le rendement soit impacté. La variation selon l'axe des températures forme ainsi une courbe en cloche moins accentuée que pour la pluviométrie.

Ces résultats sont assez cohérents avec la logique de modélisation du logiciel Aquacrop. En effet, ce logiciel se base uniquement sur un bilan hydrique des sols pour évaluer la croissance de la plante. L'effet des températures a un impact quand ces températures atteignent les limites physiologiques de la plante : température proche de zéro ou supérieur à 30°C en général.

Le graphique ci-dessous présente la même série de données sous un angle différent et certainement plus lisible.

Figure 40 : Graphique 2D, impact pluie/température sur le blé



On peut noter par exemple, en observant la courbe ne présentant aucun changement de pluviométrie (courbe 0%), que le rendement se situe autour 2,8 t/ha sans variation de température. Mais :

- ▶ Une élévation de la température moyenne de 1°C va faire chuter ce rendement à 2,5 t/ha soit une baisse d'environ 10% ;
- ▶ C'est exactement l'opposé avec une baisse de température de 1°C qui engendre un rendement supérieur d'environ 10%.

Cette zone climatique présente le cas d'une situation défavorable pour le rendement en cas d'augmentation de la température moyenne. La ZC10 est une zone où les conditions climatiques provoquent un stress hydrique impactant le rendement.

On l'observe également si l'on s'attache maintenant à regarder l'impact de la pluie. Pour une variation nulle de la température et de la pluie, nous avons vu que le rendement est de 2,8 t/ha. Avec une augmentation de 15% de la pluviométrie moyenne (courbe 15%), le rendement passe à 3,5 t/ha, soit une hausse de 25%.

CAS DE LA ZC5

Les résultats pour la ZC5 sont présentés ci-dessous.

Figure 41 : Graphique 3D, impact pluie/température sur le blé

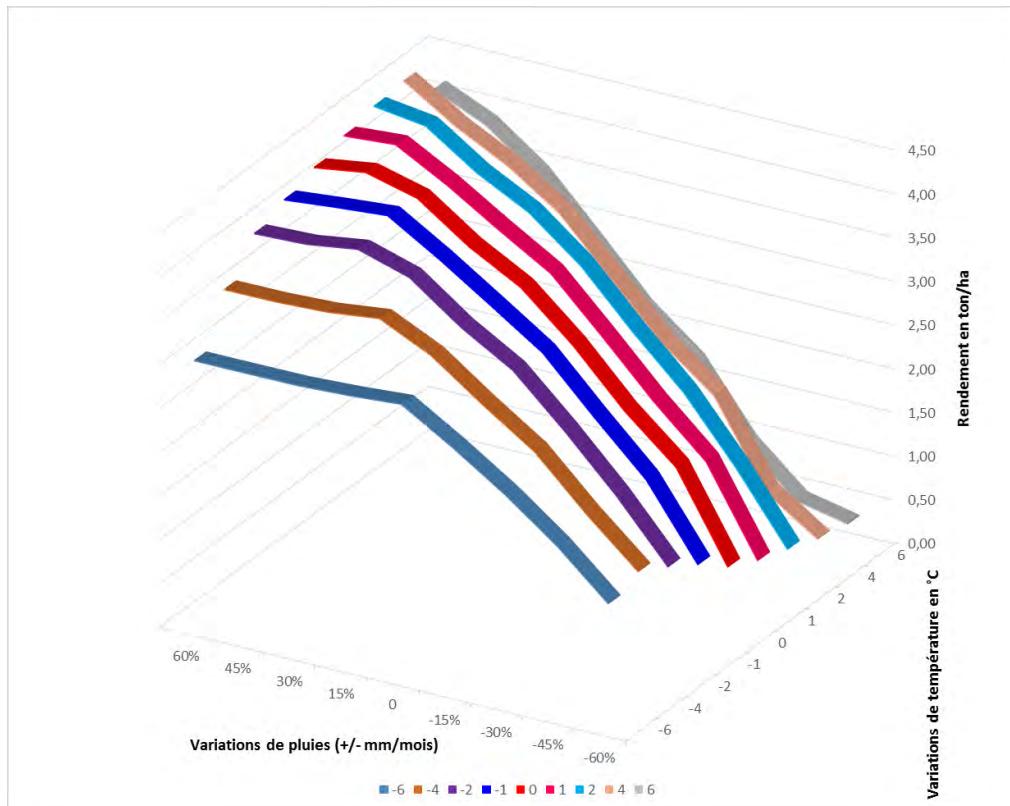
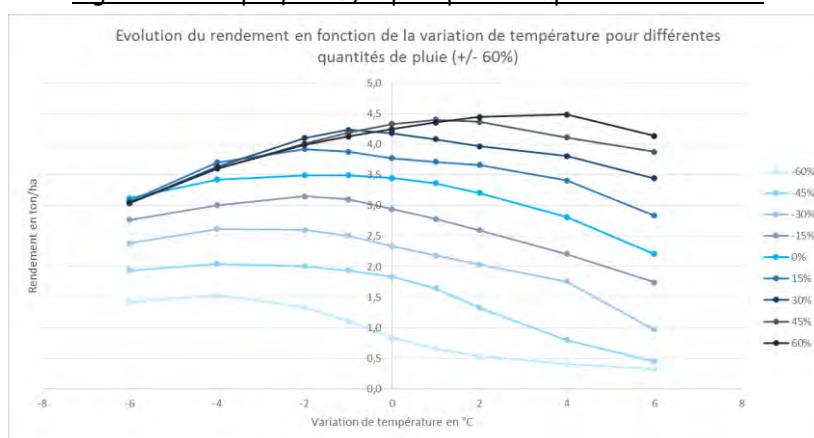


Figure 42 : Graphique 2D, impact pluie/température sur le blé

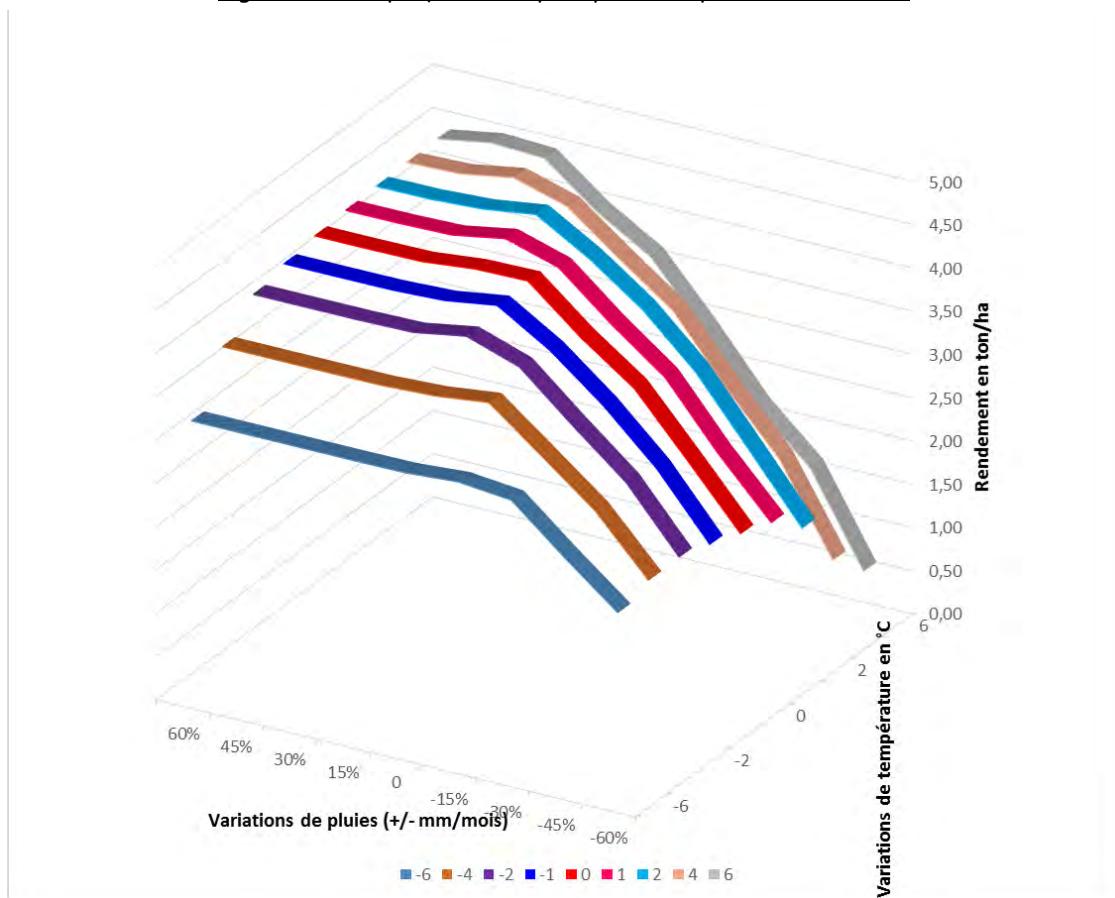
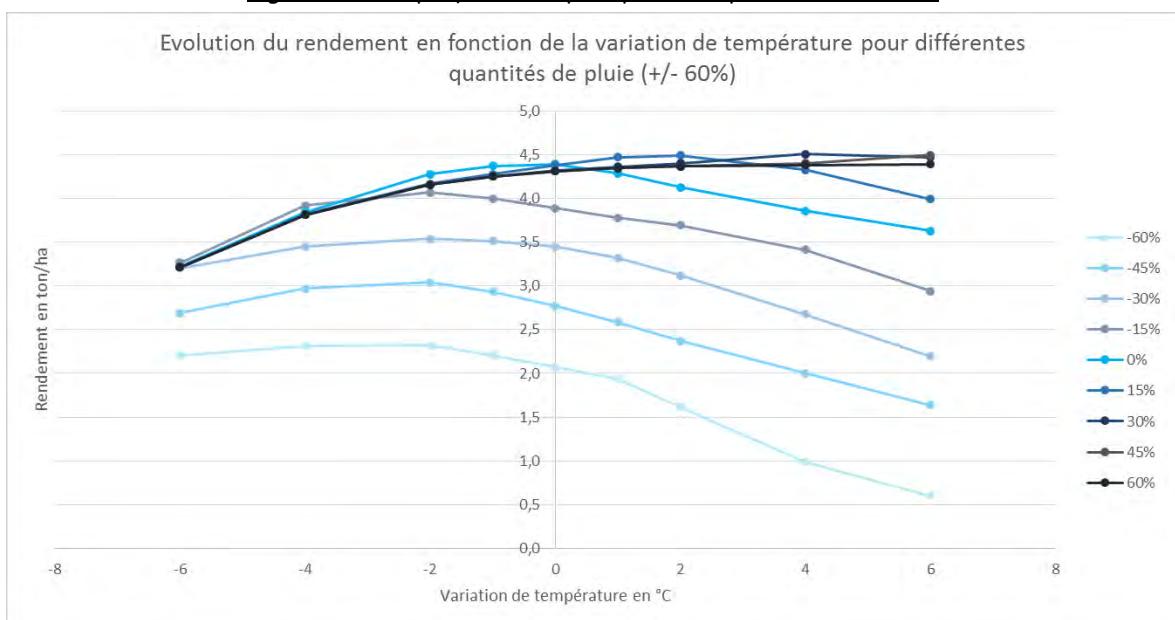


Les principales différences que l'on peut noter avec la ZC10 décrite précédemment sont les suivantes :

- La sensibilité à l'augmentation des températures est moins prononcée que pour la ZC10 ;
- Un palier est rapidement atteint concernant la hausse de la pluviométrie en condition de températures inférieures à la moyenne : les courbes 30%, 45% et 60% se rejoignent.

CAS DE LA ZC6

Les résultats pour la ZC5 sont présentés ci-dessous.

Figure 43 : Graphique 3D, impact pluie/température sur le bléFigure 44 : Graphique 2D, impact pluie/température sur le blé

Les principales différences que l'on peut noter avec la ZC10 décrite précédemment sont les suivantes :

- La sensibilité à l'augmentation des températures est moins prononcée ;
- Un palier est rapidement atteint concernant la hausse de la pluviométrie quel que soit le niveau de température : les courbes 30%, 45% et 60% se rejoignent.

4. POUR ALLER PLUS LOIN

4.1 LES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE POURRAIENT MODIFIER SIGNIFICATIVEMENT LA PRODUCTION DES CEREALES ET OLEAGINEUX DANS LA ZONE RUK

Le tableau ci-dessous présente la synthèse de l'évolution possible de la production en blé, maïs et tournesol dans la zone Russie, Ukraine, Kazakhstan, en fonction du scénario climatique et selon l'hypothèse que les surfaces cultivées n'évoluent pas dans le futur.

Figure 45 : Synthèse de l'évolution des productions à surfaces sont constantes

	Modèle modéré (CGM31)		%	Modèle extrême (MIROC32)		%
	Production de référence (base 100)	Production Future		Production de référence (base 100)	Production Future	
Blé	100	96	- 4%	100	71	- 29 %
Maïs	100	97	- 3%	100	30	- 70 %
Tournesol	100	97	- 3%	100	50	- 50 %

Ce tableau montre que l'impact du scénario modéré sera négligeable, de l'ordre de quelques pourcents de baisse qui pourront très facilement être compensés par une amélioration des pratiques culturales. **En revanche, le scénario extrême pourrait avoir un impact très fort pour les productions agricoles des 3 pays.** La baisse pourrait atteindre 30% pour le blé, 70% pour le maïs et 50% pour le tournesol.

Ces pays étant des exportateurs majeurs au niveau mondial, les conséquences sur les prix internationaux seraient alors forcément très fortes.

A ce constat, il faut rajouter le fait que l'occurrence de phénomènes climatiques extrêmes pourrait augmenter, provoquant de fortes fluctuations de production d'une année sur l'autre. **Il faut s'attendre à ce que la volatilité des prix des produits agricoles augmente fortement dans le futur.**

Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude vont dans le même sens que ceux de la recherche scientifique. Citons notamment l'article de E. Lioubimtseva (FAO, 2015)⁸ publié récemment. Cette étude conclut : (traduit de l'anglais) « [...] Les projections agro-écologiques issues des scénarios de changements climatiques suggèrent que le potentiel de production de céréales dans la Fédération de Russie, l'Ukraine et le Kazakhstan pourrait augmenter en raison d'une combinaison de l'augmentation de la température hivernale, de l'extension de la saison de culture, et de l'effet de fertilisation du CO₂ sur les cultures agricoles ; cependant, la zone semi-aride la plus productive pourrait subir une augmentation spectaculaire de la fréquence des sécheresses. [...] Notre analyse montre que les objectifs ambitieux d'augmentation de la production des céréales et de la viande dans les années 2020, formulées récemment par les gouvernements des trois pays, sont peu susceptibles d'être accomplis. »

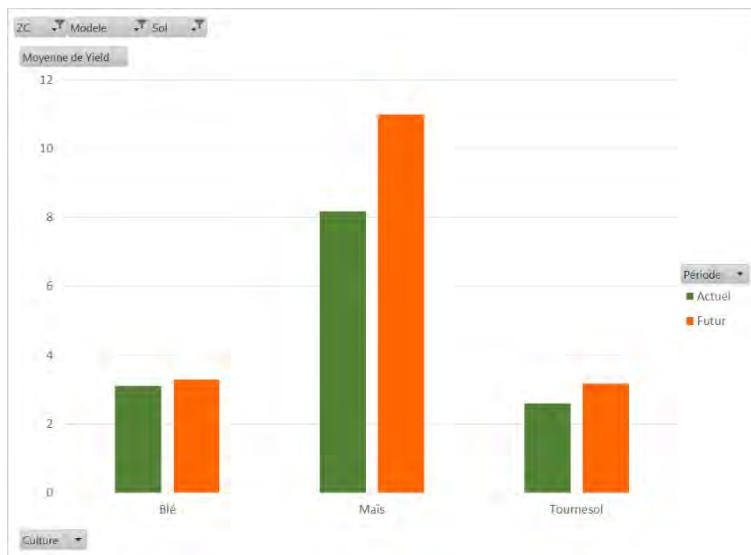
⁸ Climate Change and Food Systems: global assessments and implications for food security and trade, FAO, 2015. Chapter 7: Grain production trends in Russia, Ukraine and Kazakhstan in the context of climate change and international trade, Elena Lioubimtseva, Nicolai Dronin and Andrei Kirilenko.

4.2 LES CULTURES RÉAGISSENT DE FAÇON DIFFÉRENTE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Les trois plantes qui ont été retenues ont des fonctionnements physiologiques différents. Pour un même forçage climatique, dans une même zone climatique donnée, ces différences peuvent conduire à des modifications de rendement différentes d'une plante à l'autre.

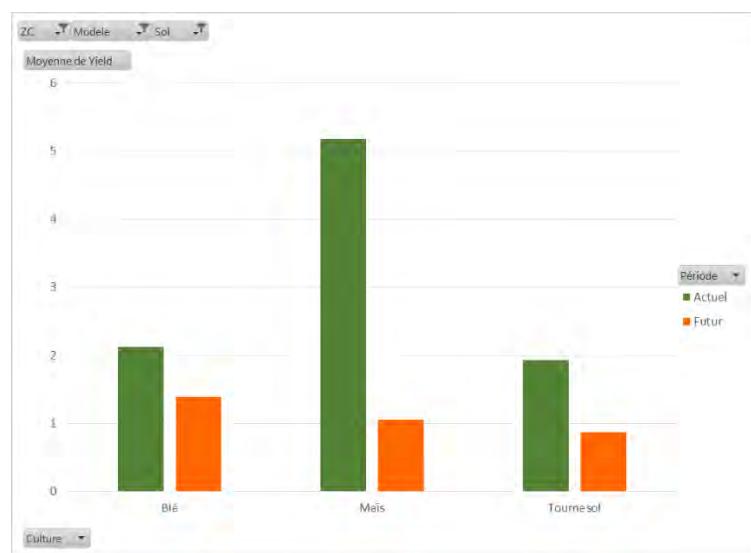
Les deux exemples ci-dessous illustrent ce phénomène.

Figure 46 : Comparaison des rendements des trois cultures dans la ZC4, sol S1, scénario extrême



Dans ce premier cas, si l'on considère la ZC4, on observe très peu de différence entre le rendement actuel et futur pour le blé et le tournesol. Par contre, il y a une forte différence pour le maïs dont le rendement déjà élevé pourrait fortement profiter du changement climatique dans cette zone.

Figure 47 : Comparaison des rendements des trois cultures dans la ZC7, sol S1, scénario extrême



A contrario dans la ZC7, le maïs est la plante la plus fortement impactée avec une baisse drastique du rendement. Cette baisse est si forte qu'elle en compromet la culture. L'impact est moindre sur le blé et le tournesol.

4.3 LES MODIFICATIONS EFFECTIVES DÉPENDRONT D'AUTRES FACTEURS QUE LE SEUL CHANGEMENT CLIMATIQUE, EN PARTICULIER DE L'ÉVOLUTION DES TECHNIQUES CULTURALES

Nous avons vu (voir 1.5) que les rendements dans la zone RUK étaient assez éloignés du rendement obtenu par les meilleurs pays céréaliers. Les rendements en Russie tournent autour de 2 t/ha, là où les rendements français sont entre 6 et 7 t/ha. La différence est de près de 4 t/ha. Cette différence s'explique principalement par l'application de pratiques culturelles améliorées dans les pays à fort rendement : utilisation de semences améliorées, respect du calendrier cultural, respect des densités, application d'une fertilisation optimisée, suivi sanitaire poussé, etc.

Il est nécessaire de mettre en perspective l'augmentation de rendement que pourrait générer une amélioration des pratiques culturelles en RUK, et l'impact du changement climatique tel que nous l'avons présenté dans cette étude. **Il existe une certaine latitude pour que l'apparition de conditions plus défavorables aux cultures dans le futur soit compensée par une amélioration des pratiques culturelles.** Cette compensation pourra se faire jusqu'à un certain seuil (que nous n'avons pas mesuré dans cette étude) au-delà duquel, les conditions climatiques étant tellement défavorables, elles impacteront négativement le rendement même avec les meilleures pratiques culturelles.

Il faut préciser que l'étude n'a pris en compte que le seul effet du changement climatique sur les températures. Les pluies ont été considérées comme constantes dans le futur. Il est clair que si une combinaison de l'augmentation des températures et de la baisse de la pluviométrie se manifestait dans le futur, l'impact climatique sur le rendement serait alors bien supérieur et pourrait ne pas être compensable par l'amélioration des pratiques culturelles.

4.4 LES BAISSES DE PRODUCTIONS MISES EN ÉVIDENCE SONT ESSENTIELLEMENT DUES À UNE AUGMENTATION DU STRESS HYDRIQUE DES PLANTES : L'IRRIGATION SERA ALORS UN OUTIL MAJEUR D'ADAPTATION AU CC

Le modèle de croissance Aquacrop est essentiellement basé sur un bilan hydrique des sols. En fonction de la pluviométrie de la zone, de la RU du sol, des températures et de l'ETP, le logiciel modélise l'impact sur la plante.

Le logiciel permet de connaître pour une simulation donnée, l'impact sur le rendement dû au stress hydrique (ExpStr) ou dû au stress de température (TempStr) ou à une combinaison des deux. Ces différents stress sont exprimés en pourcentage : 100% représentant un stress maximum et 0% l'absence de stress.

Les graphiques suivants présentent pour les 3 cultures le niveau de stress par type et par ZC.

Figure 48 : Représentation du stress hydrique (ExpStr) et du stress de température (TempStr) par ZC pour le sol S1 et suivant le scénario Extrême (modèle climatique MIROC32)

Graphe du haut : Blé / Graphe milieu : Maïs / Graphe du bas : Tournesol



On remarque que :

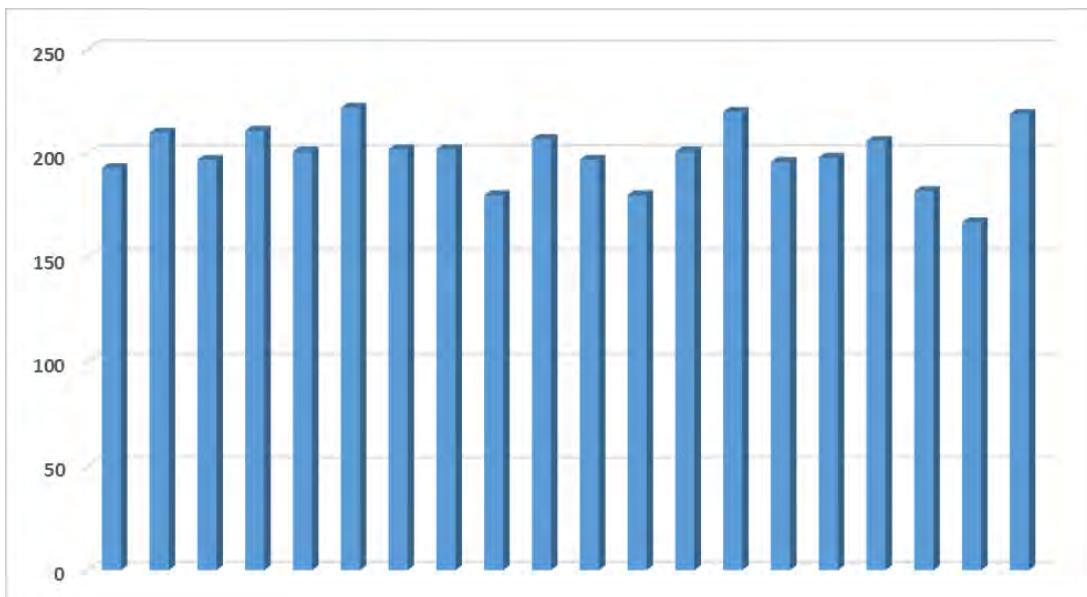
- ▶ quelle que soit la culture, le stress est majoritairement dû à un manque d'eau ;
- ▶ le blé montre le niveau de stress hydrique le plus élevé (70% en moyenne), suivi du tournesol (56% en moyenne) et enfin du maïs qui est la plante la moins affectée par le stress hydrique (40% en moyenne) ;
- ▶ c'est le maïs qui est le plus affecté par le stress de température. Ce stress est même supérieur au stress hydrique dans la ZC4. Le maïs est plus sensible aux températures froides que le blé ou le tournesol, ce qui explique ce résultat.

Il est impossible de corriger au champ l'effet d'un stress dû à une température trop élevée ou trop faible. En revanche, il est possible d'annuler le stress hydrique en ayant recours à l'irrigation. Quand une ressource en eau sera accessible (rivière, eau souterraine, stockage d'eau de pluie) et exploitable de manière durable, sans compromettre des usages plus prioritaires et sans dégrader des écosystèmes, il sera possible aux agriculteurs de l'utiliser pour compenser le manque de pluie. Il serait intéressant de mettre en perspective les besoins en irrigation par ZC et les ressources disponibles, afin d'identifier les zones où il serait possible d'irriguer.

Face à une baisse drastique des rendements dans certaines ZC dans le futur, **l'irrigation pourra constituer une des outils d'adaptation au changement climatique** dans la mesure de la disponibilité de ressource et de la possibilité de son utilisation durable, sans remise en cause d'usages prioritaires.

Nous avons simulé la quantité d'eau qu'il faudrait apporter au blé pour satisfaire totalement les besoins de la plante. Les résultats sont présentés ci-dessous.

Figure 49 : Chronique 2046-2065 des besoins d'irrigation du blé sur la ZC10 et sol S1, MIROC32 (en mm/ha)



Il faudrait apporter **environ 200 mm d'eau d'irrigation par hectare** pour la totalité du cycle sur un besoin en eau total d'environ 550mm. L'irrigation représenterait alors environ 40% du besoin en eau de la plante.

1 mm d'eau d'irrigation représente 10 m³ par hectare, donc le besoin d'irrigation ci-dessus nécessitera d'apporter **2 000 m³ d'eau par hectare cultivé en blé**, ce qui n'est pas négligeable et ne pourra certainement pas être possible partout.

4.5 PERSPECTIVES D'APPROFONDISSEMENTS

Cette étude a permis d'apporter un éclairage sur l'impact possible du changement climatique sur la production agricole en blé, maïs et tournesol de la zone Russie Ukraine Kazakhstan. Elle a également posé des questions et ouvert des perspectives de compléments de connaissances. Ces éléments de réflexion pour la suite de l'étude sont présentés ci-dessous :

- ▶ Des gains de rendement importants peuvent être attendus par la conversion de surface du blé de printemps vers le blé d'hiver. Pour pouvoir simuler ce gain, deux difficultés doivent être levées :
 - Il serait nécessaire de connaître la répartition des surfaces entre blé d'hiver et de printemps de façon précise pour les 3 pays. Nous n'avons pas pu identifier dans le cadre de cette étude une base donnée offrant cette précision ;
 - Le logiciel de simulation de croissance Aquacrop n'est pas adapté pour la simulation du blé d'hiver. Il serait nécessaire d'identifier un logiciel spécifique pour cette culture (logiciel STICS ou autre).
- ▶ Les données de surface utilisées dans le cadre de cette étude sont celles de GAEZ et datent de 2000. Ces données sont anciennes mais ce sont les seules données identifiées permettant de faire la distinction entre les différents types de culture de manière localisée. Les données géographiques habituelles de couvertures de sol ne font pas la distinction entre les cultures et mentionnent seulement « surface cultivée ». Il serait intéressant d'actualiser la présente étude avec des données de surface plus récentes. L'USDA américain devrait notamment mettre en ligne un « GlobalLandCover » prochainement avec des données de 2014-2015.
- ▶ Nous avons montré que le réchauffement des températures aura un impact sur la remontée plus au nord de la limite de culture du blé en Russie. Une expertise pédologique spécifique pourrait éclairer sur le potentiel de mise en culture des sols des zones climatiques « tempérée froide » et « boréale douce ».
- ▶ Les zones climatiques « tempérée froide » et « boréale douce », respectivement ZC5 et ZC3, pourraient porter des surfaces de blé plus importantes qu'aujourd'hui du fait du réchauffement des températures. Il est difficile de connaître la dynamique de mise en culture de ces surfaces. Une expertise spécifique pourrait donner une estimation en utilisant les bases de données de couverture des sols. En effet, la comparaison des données de « Global Land Cover » (<http://www.glcn.org>) entre plusieurs années (données disponibles 2004 / 2009 / 2014) permettrait de déterminer l'évolution récente des surfaces cultivées. Ce facteur d'évolution pourrait alors être utilisé pour établir des projections des surfaces cultivées dans ces zones climatiques.

ANNEXES

Annexe 1.

Bibliographie

CRU TS3.22, 17/09/2014: Climatic Research Unit (CRU) Time-Series (TS) Version 3.22 of High Resolution Gridded Data of Month-by-month Variation in Climate (Jan. 1901- Dec. 2013)

FAO and World Bank, 2001. Farming Systems and Poverty. Improving Farmers' Livelihoods in a Changing World. John Dixon and Aidan Gulliver with David Gibbon. Malcolm Hall.

IPCC, 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use ; Chapter 3: Consistent Representation of Lands ; Figure 3A.5.1 Delineation of major climate zones.

Kottek, M., J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf, and F. Rubel, 2006: World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. Meteorol. Z., 15, 259-263. DOI: 10.1127/0941-2948/2006/0130.

Elena Lioubimtseva, 2015. Grain Production trends in the Russian Federation, Ukraine and Kazakhstan in the context of climate change and international trade, In : Climate change and food systems : global assessments and implications for food security and trade, Aziz Elbehri (editor). Food Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, 2015.

Annexe 2.

Détail de la définition des zones climatiques

1. MÉTHODOLOGIE DE DÉFINITION DES ZONES CLIMATIQUES

1.1 OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES DE TRAVAIL

La définition des zones climatiques vise à :

- ▶ Définir un zonage représentatif des régions/entités climatiquement cohérentes ;
- ▶ Définir un zonage qui permette d'estimer l'impact du changement climatique sur la production végétale ;
- ▶ Définir un zonage qui soit cohérent avec la réalité et la géographie des pratiques agricoles à l'échelle des 3 pays.

Pour cela, et afin de limiter le volume des calculs et des analyses, il est proposé de retenir de l'ordre d'une dizaine de zones climatiques, définies avec plus de finesse/précision au niveau des régions de production agricole.

1.2 DONNÉES DE RÉFÉRENCE

Les données et informations de référence utilisées pour la définition des zones climatiques sont de 3 types :

- ▶ La cartographie de la classification climatique de Köppen-Geiger (Kottek, et al. 2006). La classification climatique du GIEC a également été utilisée pour des recoupements (IPCC, 2006) ;
- ▶ Les bases de données climatiques de l'Unité de Recherche sur le Climat de l'Université de l'East Anglia (*Climatic Research Unit, University of East Anglia*) (CRU, 2014) ;
- ▶ La cartographie des principaux systèmes agraires d'Europe de l'Est et d'Asie Centrale de la FAO (FAO, 2001).

La classification climatique de Köppen-Geiger

Il s'agit d'un système de classification des climats, mis au point par W.P. Köppen dans les années 1920 et régulièrement mis à jour depuis, fondé sur les précipitations et les températures. Un climat est ainsi repéré par un code de trois lettres (le détail est indiqué en Annexe 2 Figure 2) :

- ▶ La 1^{ière} lettre indique le type de climat ;
- ▶ La 2^{ème} lettre indique le régime pluviométrique ;
- ▶ La 3^{ème} lettre indique les variations de températures.

Ce système de classification climatique fait référence. Il est utilisé dans un très grand nombre d'études climatiques et de publications, et est repris très largement dans les études hydrologiques, agronomiques, géographiques, etc.

L'extraction de cette cartographie climatique à l'échelle des 3 pays (RUK) de la zone d'étude est présentée en Annexe 2 Figure 1. Son analyse permet d'identifier les principales entités climatiques de la région RUK :

- ▶ La zone polaire (ET) et continentale extrême (Dfd, Dwd) à l'extrême Nord et à l'Est de la Russie ;
- ▶ Une grande zone de climat boréal (Dfc) au centre de la Russie ;
- ▶ Une zone de climat tempéré, humide, à étés doux (Dfa, Dfb) au Nord du Kazakhstan, au Sud-Ouest de la Russie et en Ukraine ;
- ▶ Une zone de climat aride (BSk, BWk) au sud du Kazakhstan ;
- ▶ Une zone de climat doux et humide (Cfa, Cfb) à l'extrême sud-ouest de la Russie et Sud-Est de l'Ukraine ;
- ▶ Une zone de climat de type méditerranéen (Csa, Dsa ; étés chauds et secs) le long de la frontière Sud-Est du Kazakhstan.

La classification climatique du GIEC a également été utilisée pour recouper et vérifier ces observations (Annexe 2 Figure 3).

Les bases de données climatiques CRU

L'Unité de Recherche sur le Climat de l'Université de l'East Anglia (*Climatic Research Unit, University of East Anglia*) a établi et mis à jour chaque année une base de données répertoriant 15 paramètres climatiques au pas de temps mensuel, à l'échelle mondiale et de résolution $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. Ces paramètres sont calculés/simulés à partir des données observées collectées auprès des services météorologiques nationaux. La dernière version de cette base de données, datant de septembre 2014, répertorie les séries climatiques de 1901 à 2013. Les 5 paramètres climatiques les plus pertinents pour l'étude ont été extraits pour la zone RUK et analysés :

- ▶ La précipitation (mm)
- ▶ La température moyenne ($^\circ\text{C}$) ;
- ▶ La température minimale moyenne ($^\circ\text{C}$) ;
- ▶ La température maximale moyenne ($^\circ\text{C}$) ;
- ▶ L'évapotranspiration potentielle (mm).

A partir de ces 5 paramètres, d'autres indicateurs climatiques, tels que le cumul des précipitations de mars à septembre ou le bilan hydrique (P-ETP) pertinents pour l'analyse agronomique, ont également été calculés.

La moyenne interannuelle sur la période 1901-2013 de chacun de ces paramètres est présentée dans les cartes ci-après. Ces cartes fournissent des éléments d'analyse supplémentaires permettant d'affiner le zonage climatique par l'identification :

- ▶ Des courbes d'isohyètes caractéristiques (Annexe 2 Figure 4) :
 - L'isohyète 200 mm définissant généralement les zones arides. Au sud du Kazakhstan par exemple.
 - L'isohyète 500 mm définissant généralement les zones semi-arides. Au Nord du Kazakhstan et au centre de la Russie par exemple.
- ▶ D'une zone à forts cumuls pluviométriques (>400 mm) de mars à septembre à l'Extrême Ouest de l'Ukraine et de la Russie (Annexe 2 Figure 5) ;
- ▶ D'une zone à forts cumuls pluviométriques (300-600 mm) de mars à septembre à l'Extrême Est de l'Ukraine et l'Extrême Sud-Ouest de la Russie (Annexe 2 Figure 5) ;
- ▶ D'une zone à forts cumuls pluviométriques (>400 mm) de mars à septembre à l'Extrême Sud-Est de la Russie (Annexe 2 Figure 5) ;
- ▶ Des courbes d'iso-température remarquables, telles que les courbes $\text{Tmoy } 0^\circ\text{C}$, $\text{Tmin } 0^\circ\text{C}$ ou $\text{Tmax } 0^\circ\text{C}$ (Annexe 2 Figures 7 à 9) ;

La cartographie des principaux systèmes agraires de la FAO

Enfin, la cohérence de la délimitation des zones climatiques avec les objectifs de l'étude a été vérifiée et affinée à partir de la répartition des principaux systèmes agraires de la région RUK. L'analyse de la carte de la FAO (Annexe 2 Figure 10) permet en effet d'identifier des zones remarquables qu'il semble tout à fait pertinent d'isoler dans le cadre de cette étude :

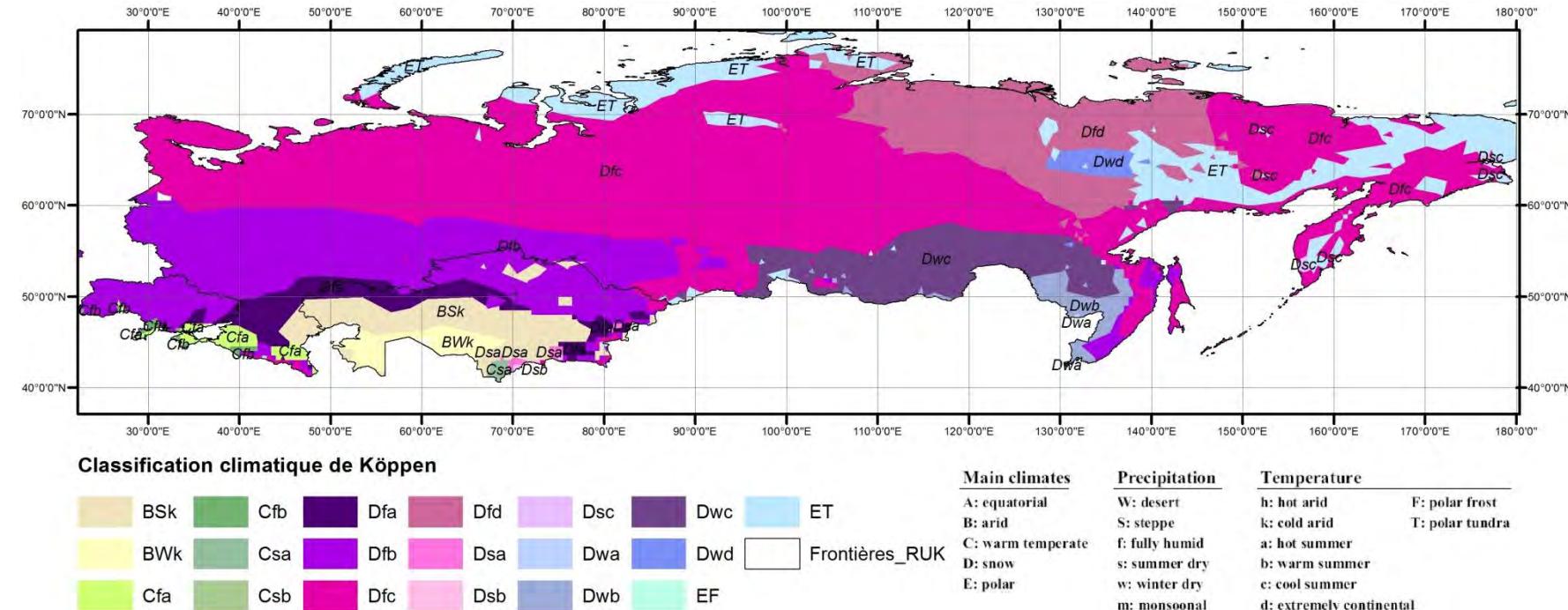
- ▶ La zone aride (10) au sud du Kazakhstan ;
- ▶ La zone d'élevage et de cultures extensifs (7) au Nord du Kazakhstan et au Sud-Ouest de la Russie ;
- ▶ La zone d'élevage et de cultures extensifs (7) au Sud-Est de la Russie ;
- ▶ La zone d'agriculture irriguée (1) à l'extrême sud-ouest de la Russie et Sud-Est de l'Ukraine ;
- ▶ La zone pastorale (8) et d'agriculture irriguée (1) le long de la frontière Sud-Est du Kazakhstan.

1.3 DÉLIMITATION DES ZONES CLIMATIQUES

A partir de ces observations, 12 zones climatiques ont été définies comme suit :

- ▶ **ZC1 - Polaire et continentale extrême.** Définie au Sud par la limite Dfc/ET-Dfd de la classification de Köppen.
- ▶ **ZC2 - Boréale froide.** Définie au Sud par l'isohyète 500 mm et au Nord par la limite Dfc/ET-Dfd de la classification de Köppen ;
- ▶ **ZC3 - Boréale douce.** Définie au Sud par l'isohyète 500 mm et la courbe d'iso-cumul de mars à septembre 400 mm, et au Nord par l'isohyète 500 mm ;
- ▶ **ZC4 - Tempérée froide.** Définie au Nord par la courbe d'iso-cumul de mars à septembre 400 mm ;
- ▶ **ZC5 - Tempérée froide.** Définie au Nord par la limite Dfb/Dfc de la classification de Köppen, au Sud par l'isohyète 500 mm, au Sud-Ouest par la courbe d'iso-température Tmin 0°C et à l'Ouest par la courbe d'iso-cumul de mars à septembre 400 mm ;
- ▶ **ZC6- Tempérée très humide.** Définie à l'Est par la courbe d'iso-cumul de mars à septembre 400 mm.
- ▶ **ZC7 – Tempérée.** Définie à l'Est par l'isohyète 500 mm, au Nord par la courbe d'iso-température Tmin 0°C, à l'Ouest par la courbe d'iso-cumul de mars à septembre 400 mm et au Sud par la courbe d'iso-cumul de mars à septembre 300 mm ;
- ▶ **ZC8 - Tempérée chaude.** Définie au Nord par l'isohyète 500 mm, au Sud-Ouest par la courbe d'iso-cumul de mars à septembre 300 mm, au Sud par l'isohyète 300 mm et à l'Est par la courbe d'iso-température Tmin 0°C ;
- ▶ **ZC9 - Tempérée chaude-humide.** Définie au Nord par la courbe d'iso-cumul de mars à septembre 300 mm ;
- ▶ **ZC10 - Semi-aride.** Définie au Nord par l'isohyète 500 mm, à l'Ouest par la courbe d'iso-température Tmin 0°C, au Sud par l'isohyète 300 mm et à l'Est par la zone d'agriculture irriguée ;
- ▶ **ZC11 – Aride.** Définie par l'isohyète 300 mm ;
- ▶ **ZC12 - De type méditerranéen.** Définie par l'isohyète 300 mm et par la zone d'agriculture irriguée ;

Figure 1: Extraction de la classification climatique de Köppen-Geiger sur la zone d'étude (RUK)



Source: Adapté de Kottek, M., J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf, and F. Rubel, 2006: World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. Meteorol. Z., 15, 259-263. DOI: 10.1127/0941-2948/2006/0130.

2Figure 2 : Définition des paramètres climatiques de la classification de Köppen-Geiger

Table 1: Key to calculate the climate formula of Köppen and Geiger for the main climates and subsequent precipitation conditions, the first two letters of the classification. Note that for the polar climates (E) no precipitation differentiations are given, only temperature conditions are defined. This key implies that the polar climates (E) have to be determined first, followed by the arid climates (B) and subsequent differentiations into the equatorial climates (A) and the warm temperate and snow climates (C) and (D), respectively. The criteria are explained in the text.

Type	Description	Criterion
A	Equatorial climates	
Af	Equatorial rainforest, fully humid	$T_{\min} \geq +18^{\circ}\text{C}$
Am	Equatorial monsoon	$P_{\min} \geq 60 \text{ mm}$
As	Equatorial savannah with dry summer	$P_{\text{ann}} \geq 25(100 - P_{\min})$
Aw	Equatorial savannah with dry winter	$P_{\min} < 60 \text{ mm in summer}$ $P_{\min} < 60 \text{ mm in winter}$
B	Arid climates	
BS	Steppe climate	$P_{\text{ann}} < 10 P_{\text{th}}$
BW	Desert climate	$P_{\text{ann}} > 5 P_{\text{th}}$ $P_{\text{ann}} \leq 5 P_{\text{th}}$
C	Warm temperate climates	
Cs	Warm temperate climate with dry summer	$-3^{\circ}\text{C} < T_{\min} < +18^{\circ}\text{C}$
Cw	Warm temperate climate with dry winter	$P_{\text{wmin}} < P_{\text{wmax}}, P_{\text{wmax}} > 3 P_{\text{smin}}$ and $P_{\text{smin}} < 40 \text{ mm}$
Cf	Warm temperate climate, fully humid	$P_{\text{wmin}} < P_{\text{smin}}$ and $P_{\text{smax}} > 10 P_{\text{wmin}}$ neither Cs nor Cw
D	Snow climates	
Ds	Snow climate with dry summer	$T_{\min} \leq -3^{\circ}\text{C}$
Dw	Snow climate with dry winter	$P_{\text{wmin}} < P_{\text{wmax}}, P_{\text{wmax}} > 3 P_{\text{smin}}$ and $P_{\text{smin}} < 40 \text{ mm}$
Df	Snow climate, fully humid	$P_{\text{wmin}} < P_{\text{smin}}$ and $P_{\text{smax}} > 10 P_{\text{wmin}}$ neither Ds nor Dw
E	Polar climates	
ET	Tundra climate	$T_{\max} < +10^{\circ}\text{C}$
EF	Frost climate	$0^{\circ}\text{C} \leq T_{\max} < +10^{\circ}\text{C}$ $T_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$

Table 2: Key to calculate the third letter temperature classification (h) and (k) for the arid climates (B) and (a) to (d) for the warm temperate and snow climates (C) and (D). Note that for type (b), warm summer, a threshold temperature value of $+10^{\circ}\text{C}$ has to occur for at least four months. The criteria are explained in the text.

Type	Description	Criterion
h	Hot steppe / desert	$T_{\text{ann}} \geq +18^{\circ}\text{C}$
k	Cold steppe / desert	$T_{\text{ann}} < +18^{\circ}\text{C}$
a	Hot summer	$T_{\max} \geq +22^{\circ}\text{C}$
b	Warm summer	not (a) and at least 4 $T_{\text{mon}} \geq +10^{\circ}\text{C}$
c	Cool summer and cold winter	not (b) and $T_{\min} > -38^{\circ}\text{C}$
d	extremely continental	like (c) but $T_{\min} \leq -38^{\circ}\text{C}$

Figure 3 : Classification climatique du GIEC à l'échelle mondiale (IPCC, 2006)

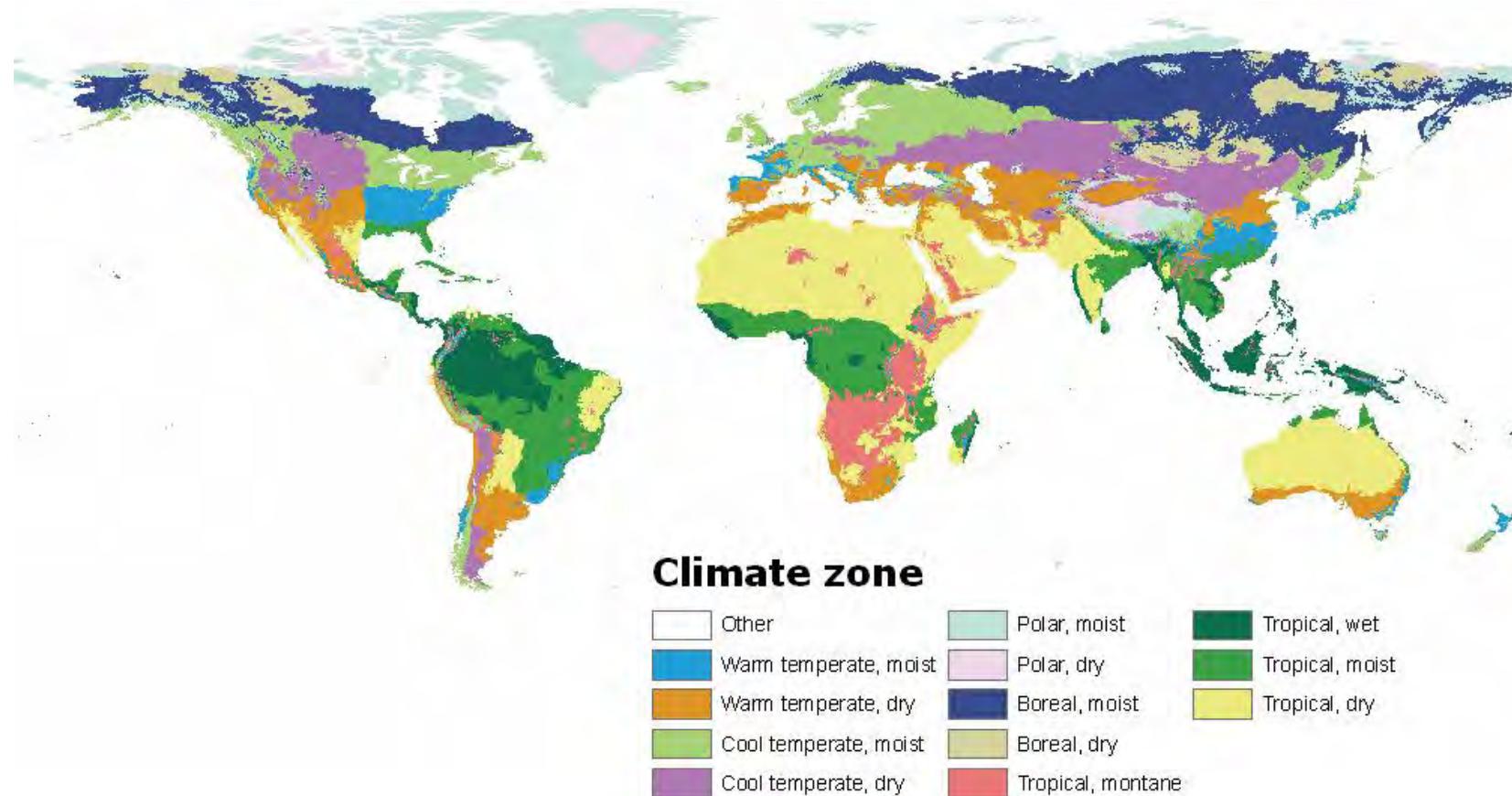


Figure 4 : Représentation cartographique des précipitations moyennes interannuelles [1901 - 2013] à partir des données CRU.

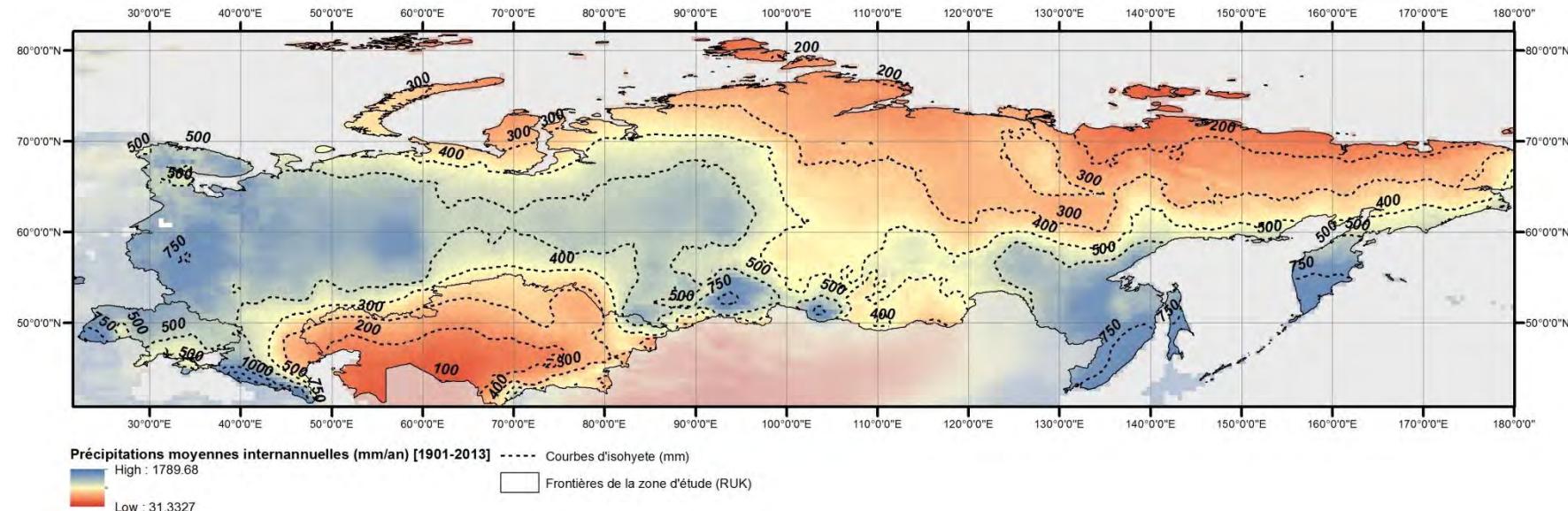


Figure 5 : Représentation cartographique des cumuls moyens de précipitations de mars à septembre [1901 - 2013] à partir des données CRU.

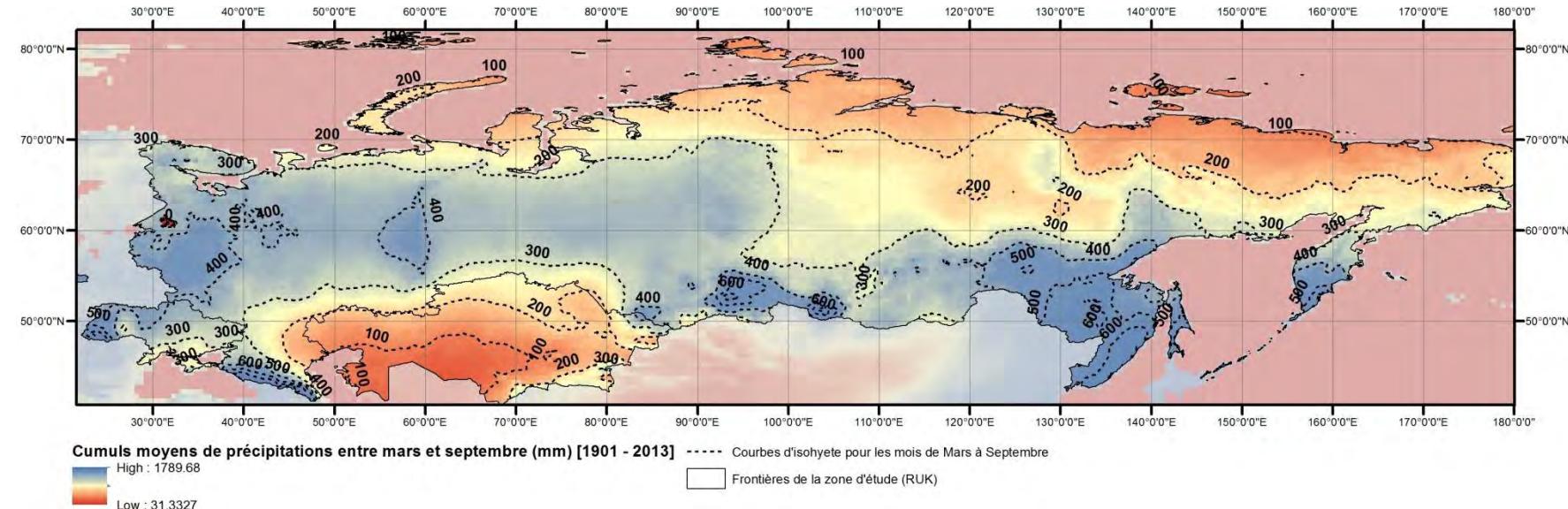


Figure 6 : Représentation cartographique de l'évapotranspiration potentielle moyenne (internannuelle) [1901 - 2013] à partir des données CRU.

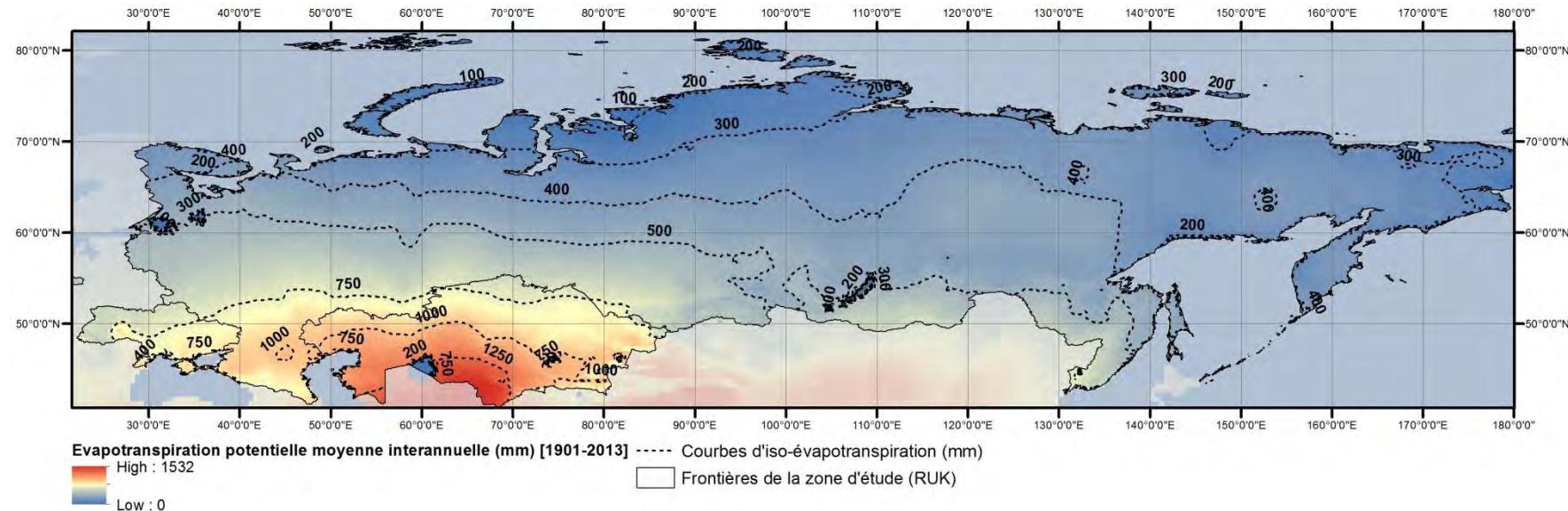


Figure 7 : Représentation cartographique des températures moyennes interannuelles [1901 - 2013] à partir des données CRU.

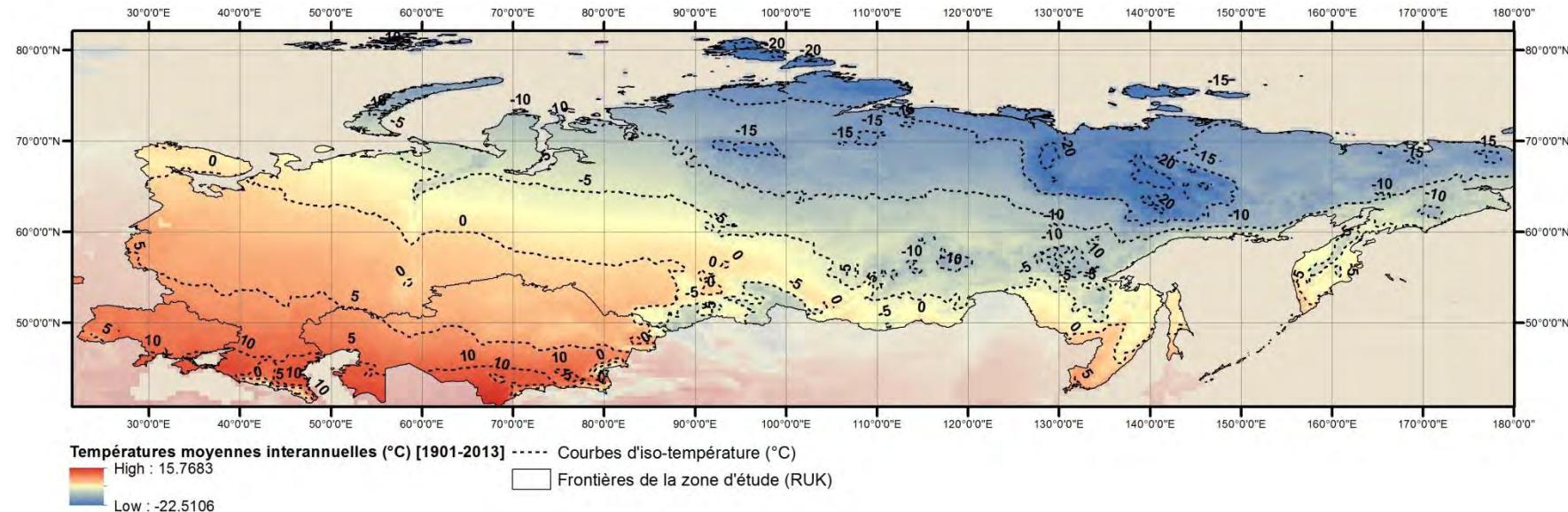


Figure 8 : Représentation cartographique des températures minimales moyennes interannuelles [1901 - 2013] à partir des données CRU.

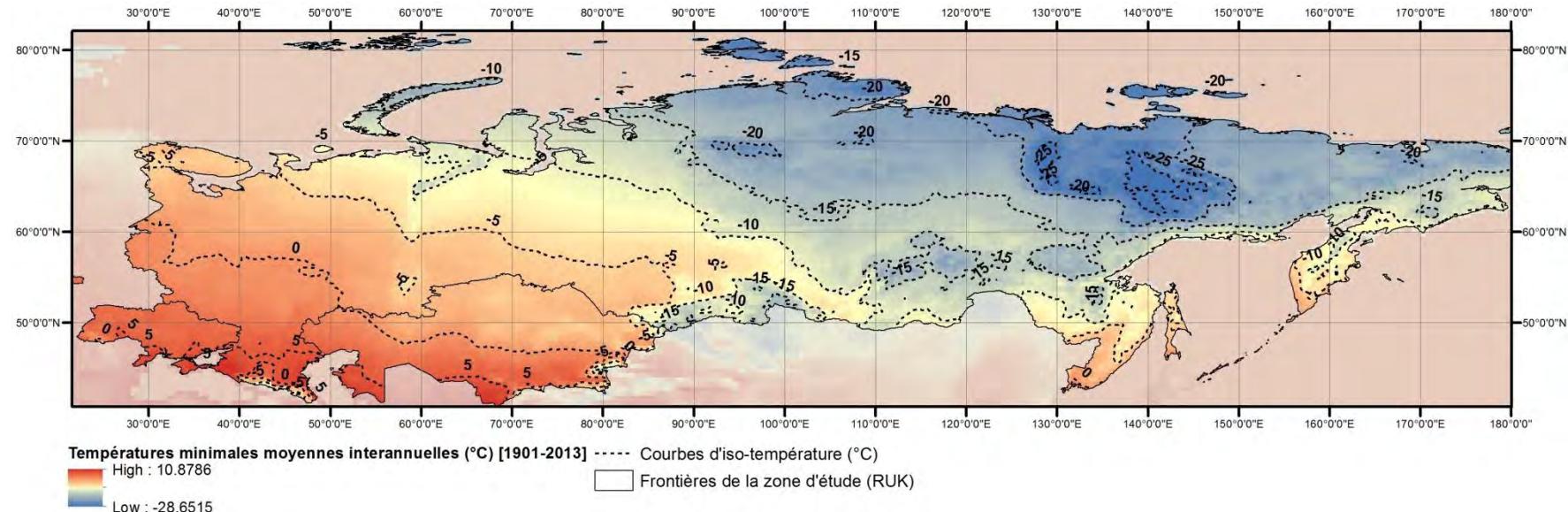


Figure 9 : Représentation cartographique des températures maximales moyennes interannuelles [1901 - 2013] à partir des données CRU.

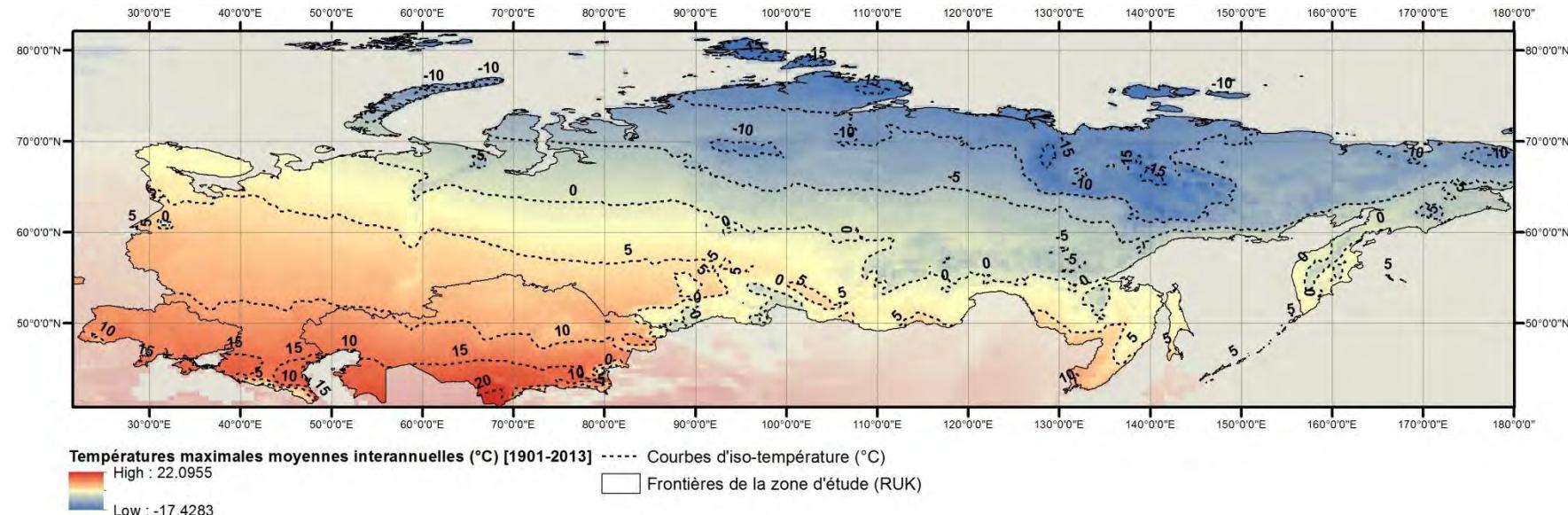
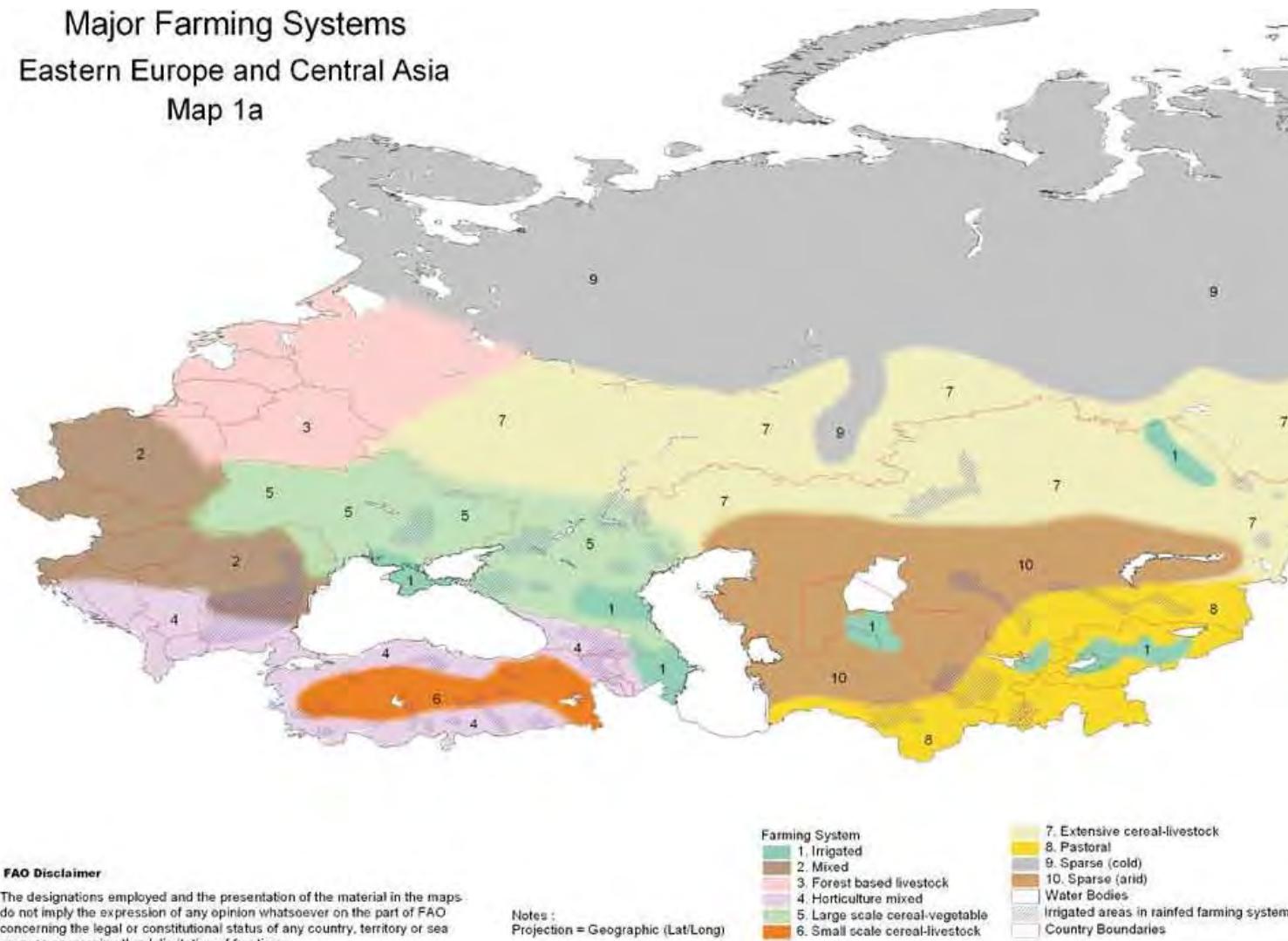
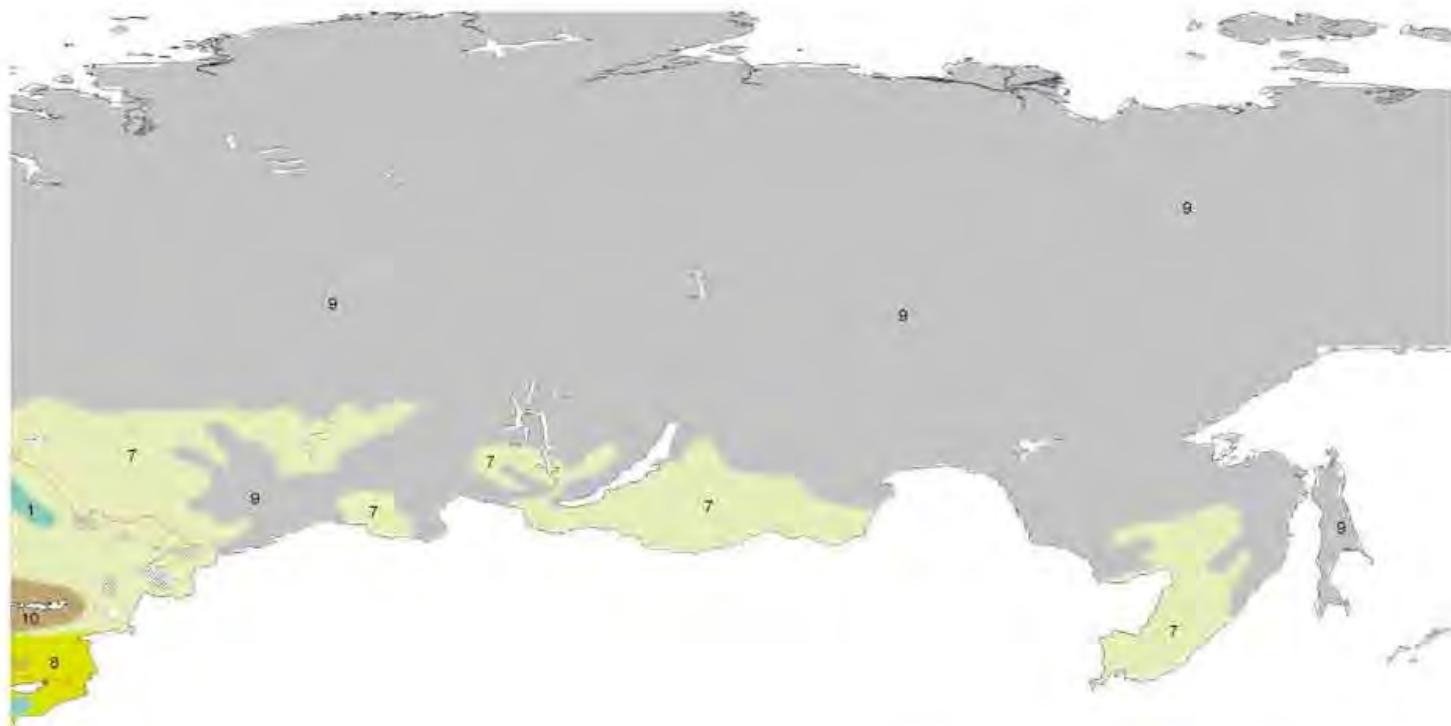


Figure 10 : Principaux systèmes agraires en Europe de l'Est et en Asie Centrale (FAO, 2001)

Major Farming Systems
Eastern Europe and Central Asia
Map 1a



Major Farming Systems
Eastern Europe and Central Asia
Map 1b



FAO Disclaimer

The designations employed and the presentation of the material in the maps do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of FAO concerning the legal or constitutional status of any country, territory or sea area, or concerning the delimitation of frontiers.

Notes :
 Projection = Geographic (Lat/Long)

Farmers' Livelihoods in a Changing World. John Dixon and Aidan Gulliver with David Gibon, Malcolm Hall, FAO and World Bank, 2001.

Farming System	
1. Irrigated	7. Extensive cereal-livestock
2. Mixed	8. Pastoral
3. Forest based livestock	9. Sparse (cold)
4. Horticulture mixed	10. Sparse (arid)
5. Large scale cereal-vegetable	Water Bodies
6. Small scale cereal-livestock	Irrigated areas in rainfed farming systems
	Country Boundaries

Source: Farming Systems and Poverty. Improving

Annexe 3.

Détail de la méthodologie pour la définition des zones de sol

1.1 MÉTHODOLOGIE

Il existe une classification simplifiée proposée par le GIEC¹ qui sépare les sols en 2 principaux groupes: les sols organiques et les sols minéraux. Les sols organiques sont des sols très riches en carbone (en général >12%). Les autres sols (sols minéraux) sont répartis selon 6 catégories :

- ▶ Sols sablonneux ;
- ▶ Sols volcaniques ;
- ▶ Sols spodiques ;
- ▶ Sols des terres humides ;
- ▶ Sols argileux actifs ;
- ▶ Sols argileux peu actifs.

Cette classification est celle utilisée pour les inventaires nationaux des émissions de gaz à effet de serre. Le GIEC (IPCC, 2006) propose des valeurs par défaut des stocks de carbone (0-30 cm) dans ces sols selon cette classification et par type de climat.

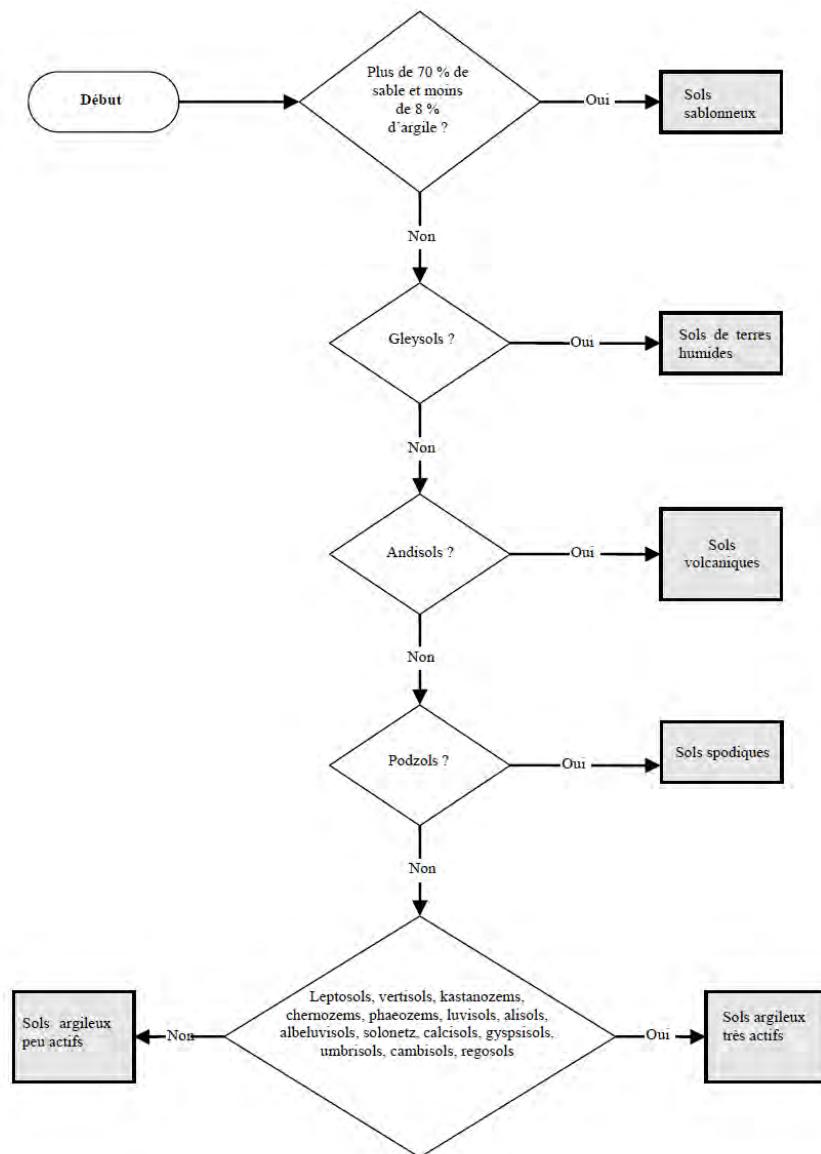
Tableau 1 : Stocks de C par défaut pour les sols minéraux à une profondeur de 30 cm (t C.ha⁻¹) pour les climats boréal et froid tempéré

Climat de la Région	Sols argileux actifs	Sols argileux peu actifs	Sols sablonneux	Sols Spodiques	Sols Volcaniques	Sols des terres humides
Boréal Sec	68		10	117	20	146
Boréal Humide	68		10	117	20	146
Froid Tempéré Sec	50	33	34		20	87
Froid Tempéré Humide	95	85	71	115	130	87

Le GIEC propose un arbre de décision pour passer de la classification WRB de la FAO à celle du GIEC. Cet arbre de décision est présenté ci-dessous.

¹ GIEC –IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006. GIEC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. In: Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. (Eds.), Agriculture, Forestry and Other Land Use, vol. 4. IGES, Japan. 2006

Tableau 2 : Système de classification des types de sols minéraux en fonction de la nomenclature de la Base de référence sur les ressources en sols du monde (WRB).



Toutefois la classification WRB a évolué et celle utilisée par le GIEC ne correspond pas à la classification utilisée par le HWSD². L'ISRIC³ propose des équivalences. A partir de ces références. Le tableau ci-dessous donne la liste des types de sols selon la nomenclature du GIEC.

Tableau 3 : Type de sols et leur correspondances selon le GIEC

HWSD	NAME	IPCC	GIEC
AN	Andosols	Andosols	Sols volcanique
AR	Arenosols	Sandy Soils	Sols sablonneux
AT	Anthrosols	HAC Soils	Sols argileux actifs
CH	Chernozems	HAC Soils	Sols argileux actifs

² Harmonized WxWorld Soil Database. HWSD est une référence pour les sols du monde mais qui comporte plus de types de sols que la classification GIEC.

³ International Soil Reference and Information Centre.

CL	Calcisols	HAC Soils	Sols argileux actifs
CM	Cambisols	HAC Soils	Sols argileux actifs
DS	Sand Dunes	Sandy Soils	Sols sablonneux
FL	Fluvisols	HAC Soils	Sols argileux actifs
GG	Glaciers	No Soils	Pas de sol
GL	Gleysols	Wet soils	Sols Terre Humide
GR	Greyzems	HAC Soils	Sols argileux actifs
GY	Gypsisols	HAC Soils	Sols argileux actifs
HS	Histosols	Organic Soils	Sols organiques
KS	Kastanozems	HAC Soils	Sols argileux actifs
LP	Leptosols	HAC Soils	Sols argileux actifs
LV	Luvisols	HAC Soils	Sols argileux actifs
PD	Podzoluvisols	HAC Soils	Sols argileux actifs
PH	Phaeozems	HAC Soils	Sols argileux actifs
PL	Planosols	HAC Soils	Sols argileux actifs
PT	Plinthosols	LAC Soils	Sols argileux peu actifs
PZ	Podzols	Spodosols	Sols Spodiques
RG	Regosols	HAC Soils	Sols argileux actifs
RK	Rock Outcrop	No Soils	Pas de sol
SC	Solonchaks	HAC Soils	Sols argileux actifs
SN	Solonetz	HAC Soils	Sols argileux actifs
UR	Urban, mining, etc	No Soils	Pas de sol
VR	Vertisols	HAC Soils	Sols argileux actifs
WR	Water	No Soils	Pas de sol

Nous proposons de reprendre la classification proposée par le GIEC comme référence car elle utilisée dans le cadre de simulation de changement climatique comme la présente étude.

On peut distinguer 8 groupes de sols :

- ▶ Groupe 1 : Les sols en « zems » : Chernozems, Greyzems, Kastanozems et Phaeozems.
- ▶ Groupe 2 : Les sols riches en calcium ou sodium (c'est-à-dire les sols carbonatés ou salinisés): Calcisols, Gypsisols, Solonchaks et Solonetz.
- ▶ Groupe 3 : Les autres sols argileux actifs : Anthrosols, Cambisols, Fluvisols, Leptosols, Luvisols, Podzoluvisols, Planosols, Regosols et Vertisols.
- ▶ Groupe 4 : Les sols sableux (Arenosols et Sand Dunes).
- ▶ Groupe 5 : les sols spodiques (Podzols).
- ▶ Groupe 6 : Sols des terres humides (Gleysols).
- ▶ Groupe 7 : Les sols volcaniques (Andosols).
- ▶ Groupe 8 : Les sols organiques.

Les groupes 5, 6, 7, 8 peuvent être fusionnés car ce ne sont pas (sauf cas exceptionnels) des sols agricoles, la classification pourrait alors comporter seulement 5 groupes principaux :

- ▶ S1, groupe 1, sols typiques des steppes
- ▶ S2, groupe 2, sols carbonatés ou salinisés
- ▶ S3, groupe 3, autres sols argileux actifs

- S4, groupe 4, sols sableux et dunes
- S5, groupe 5, 6, 7 et 8, sols avec des spécificités marquées (volcanique, spodique, etc.).

1.2 DESCRIPTION DES DIFFÉRENTS GROUPES DE SOLS

1.2.1 Répartition géographique des sols

Les sols se répartissent de façon très différente entre la Russie, l'Ukraine et le Kazakhstan comme le montre les graphiques suivants.

Figure 1 : Répartition des groupes de sols en RUK en pourcentage



En Russie, les sols S3 (autres sols argileux actifs) et S5 (sols avec des spécificités marquées) près de 90% des surfaces du pays.

En Ukraine, les sols S1 (sols typiques des steppes) représentent 70% des surfaces et S3 (autres sols argileux actifs) 24%.

Enfin, au Kazakhstan c'est les sols S2 (sols carbonatés ou salinisés) qui sont dominants (38%). Les sols S1 (sols typiques des steppes) sont également bien représentés avec 34% des surfaces.

Cette représentation sous forme de pourcentage masque la réalité des surfaces en jeu. Le tableau ci-dessous présente les surfaces par types de sols et par pays.

Tableau 4 : Répartition des groupes de sols en RUK en surface (ha)

Groupe	Kazakhstan	Russie	Ukraine
S1	893 324	1 857 924	416 243
S2	1 024 503	192 604	1 640
S3	308 248	7 501 052	141 570
S4	273 357	88 408	5 937
S5	161 627	6 623 116	29 045
Total	2 661 060	16 263 104	594 436

On s'aperçoit alors que la Russie avec seulement 11% de sols S1, porte en fait la surface la plus importante des trois pays avec 1,8 Mha contre 0,9 Mha pour l'Ukraine et 0,5 Mha pour le Kazakhstan. Il en est de même pour les sols S3 et S5.

L'Ukraine quant à elle, porte la plus grande surface de sol S2 avec plus d'1 Mha et de sols S4 avec 0,3 Mha.

1.2.2 S1. Groupe 1 : Les sols typiques des Steppes

Ce groupe réuni l'essentiel des meilleurs sols cultivés de la région. Ce sont tous des sols qui appartiennent au groupe des « Sols argileux très actifs » selon le GIEC⁴. Il correspond aux sols classés comme « Chernozems », « Greyzems », « Kastanozems » et « Phaeozems ».

Figure 2 : Photos Chernozem



Ces sols concernent notamment l'Ukraine, la partie nord du Kazakhstan et la partie sud de la Russie proche de ces deux pays.

Les chernozems ont été décrits dès la fin du XIX^{ème} siècle par le célèbre pédologue Russe Vassili Dokoutchiae. Ils correspondaient alors aux sols des steppes herbacés qui sont de nos jours cultivés. Ils correspondent à la zone climatique avec des précipitations annuelles entre 200 et 600 suivant les conditions de température⁵. Ce type de sol est souvent considéré comme l'un des meilleurs du monde.

⁴ GIEC –IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006. GIEC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. In: Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. (Eds.), Agriculture, Forestry and Other Land Use, vol. 4. IGES, Japan. 2006

⁵ Reynolds S.G., Batello C. 2005. Grasslands of the world. Plant Production and Protection Series, n°34, FAO, Rome, Italie, 515 p

En effet, les Chernozems sont des sols bien drainés avec une épaisse couche arable noire caractérisée par une très forte accumulation d'humus, et une structure granulaire qui les rend friable. Ils font places aux Kastanozems dans les régions les plus sèches et aux Phaeozems dans les zones plus humides. Les Greyzems font maintenant parties des Kastanozems dans la dernière classification FAO⁶. Pour les Kastanozems, la sécheresse est donc souvent le facteur limitant, aussi doit-on pratiquer une agriculture qui s'y adapte. De ce fait, on cultive surtout le blé.

La richesse naturelle de ces sols a toutefois largement décliné. En effet, ces sols se dégradent et leur productivité décline régulièrement depuis des décennies car ils sont souvent victimes d'érosion hydrique et/ou d'érosion éolienne⁷. En terme de stabilité/qualité du carbone contenu dans la matière organique, selon des auteurs comme Rodoniov et ses collaborateurs⁸ (2006) jusqu'à 20% du carbone de ces sols correspond à une fraction très stable appelée « black carbone ».

1.2.3 S2. Groupe 2 : Les Sols carbonatés ou salinisés

Ce groupe comprend les sols carbonatés (Calcisols ou Gypsisols) et les sols salinisés (Solonchaks et Solonetz). Ce sont également des « Sols argileux très actifs » selon la nomenclature du GIEC.

Tous ces sols sont très riches en cations. Les sols carbonatés sont des sols typiques des régions de climat aride ou semi-aride. Ces sols sont riches en calcium, soit sous la forme de carbonates (CaCO_3) pour les Calcisols, soit sous la forme de gypse (CaSO_4) pour les Gypsisols. Les cations dominant pour les Solonetz et les Solonchaks sont le sodium et le magnésium. Il y a souvent une transition entre ceux-ci et les sols carbonatés lorsqu'il y a accumulation de gypse ou de calcite sous l'horizon salinisé. Les sols carbonatés peuvent être cultivés dans certaines conditions surtout lorsque les teneurs en carbonates ou gypse ne sont pas maximales. Ils peuvent être utilisés pour la production de petites céréales, de coton et des cultures fourragères. Souvent l'irrigation et le drainage sont nécessaires pour la culture de plantes annuelles ou d'arbres fruitiers. Néanmoins ils conviennent pour le pâturage extensif. Les Solonchaks et Solonetz, quant à eux, sont des types de sol très difficiles à gérer et nécessitent des efforts importants pour être productif. Seule la production de cultures tolérantes au sel est possible.

Ces sols concernent notamment toute la partie centrale et sud du Kazakhstan et représentent 40% du territoire.

1.2.4 S3. Groupe 3 : Les autres sols argileux actifs

Ce groupe concerne l'ensemble des autres « sols argileux actifs » du GIEC. Ce sont les Anthrosols, Cambisols, Fluvisols, Leptosols, Luvisols, Podzoluvisols, Planosols, Regosols et Vertisols. Ce groupe est donc relativement hétérogène, le seul point commun étant une fertilité relativement bonne quand d'autres facteurs ne limitent ou n'empêchent pas leur mise en culture comme le climat boréal trop froid ou l'épaisseur insuffisante du sol. En Ukraine, ils se rencontrent dans la partie ouest et nord-ouest de l'Ukraine où ils sont souvent cultivés. Leur distribution est plus éparses en Russie et se trouve sous des climats très divers.

⁶ FAO. 2014. World reference base for soil resources 2014 : International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Report 106. Rome, 191 pages.

⁷ Fileccia T., Guadagni M., Hovhera V., Bernoux M. 2014. Ukraine : Soil fertility to strengthen climate resilience. Preliminary assessment of the potential benefits of conservation agriculture. Working Paper 91850, Directions in investment. Washington, DC : World Bank Group

⁸ Rodionov A., Amelung W., Haumaier L., Urusevskaja I., Zech W. Black carbon in the zonal steppe soils of Russia. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 2006, 169, 363–369

1.2.5 S4. Groupe 4 : Sols Sableux

Ce groupe réunit les sols de texture très sableuse (teneur en sables en général supérieur à 80%) et les dunes de sables. Ils sont très peu cultivables car présentent une rétention très faible en eau du fait même de leur texture. Ces sols se concentrent notamment dans les parties sud du Kazakhstan. Leur teneur en matière organique et donc en carbone est des plus faibles.

1.2.6 S5. Groupe des sols avec des spécificités marquées

Ce groupe est très hétéroclite et regroupe entre autres les sols qui appartiennent aux 4 catégories suivantes du GIEC : Les sols spodiques (ou les Podzols), les sols des terres humides (les gleysols), les sols volcaniques (les Andosols) et les sols organiques (les Histosols). Ces sols sont généralement peu ou pas cultivés. Toutefois ils peuvent l'être dans certains cas, comme par exemple les Podzols qui sont le plus souvent pauvres et peu adaptés à l'agriculture, mais qui peuvent être très productifs pour les cultures lorsqu'ils sont limoneux et bien drainés, sous réserve de pratiquer un chaulage et un apport d'engrais.

1.2.7 Synthèse de l'aptitude culturelle des différents groupes de sols

Les groupes de sols que nous avons décrit présentent des caractéristiques intrinsèques particulières qui définissent leur niveau de fertilité et leur faciliter à être travailler. Le tableau ci-dessous présente la synthèse de cette aptitude culturelle.

Tableau 5 : Synthèse de l'aptitude culturelle des sols

Groupe de sols	Aptitude culturelle
S1. Groupe 1 : Les sols typiques des Steppes	+++
S2. Groupe 2 : Les Sols carbonatés ou salinisés	+
S3. Groupe 3 : Les autres sols argileux actifs	++
S4. Groupe 4 : Sols Sableux	-
S5. Groupe des sols avec des spécificités marquées	+ ++

Légende :

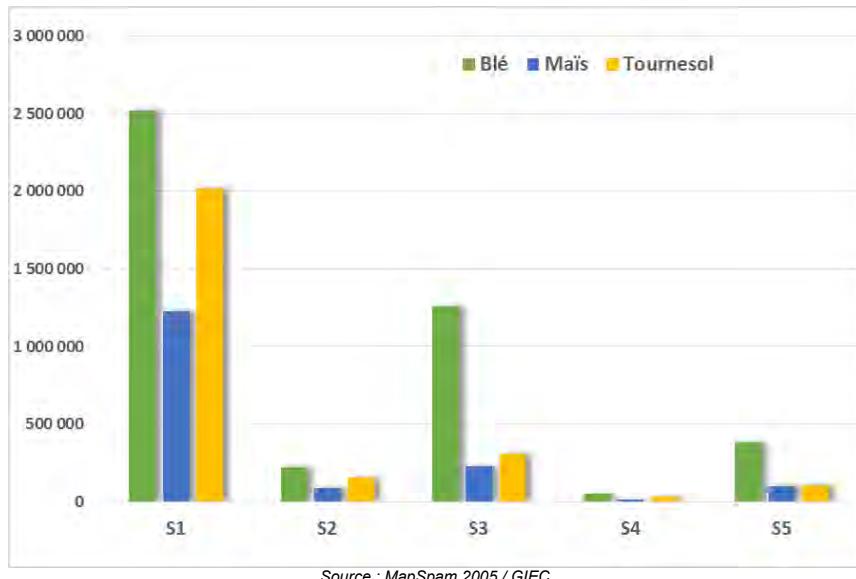
+++	Forte aptitude à la mise en culture
++	Bonne aptitude à la mise en culture
+	Mise en culture possible mais présence de facteur(s) limitant(s)
-	Présence de facteur(s) limitant(s) rédhibitoire à la mise en culture

Ce sont les sols S1 qui regroupent les Chernozems, Greyzems, Kastanozems et Phaeozems qui ont la plus grande aptitude à la mise en culture. Le groupe S3 (Anthrosols, Cambisols, Fluvisols, Leptosols, Luvisols, Podzoluvisols, Planosols, Regosols et Vertisols) présente également une bonne aptitude culturelle. Les sols S2 et S5 peuvent à être adaptés à l'agriculture mais ne disposent d'une fertilité satisfaisante.

Enfin, les sols S4 regroupant les sols sableux et les dunes, ne sont pas destinés à priori à l'agriculture.

Ces aptitudes culturelles sont confirmées par la mise en valeur agricole. Le graphique ci-dessous présente la répartition des surfaces en blé, maïs et tournesol en fonction du type de sol pour l'année 2005.

Figure 3 : Répartition des cultures par type de sols



Les sols S1 portent le plus de surface toute culture confondue. Les sols S3 portent des surfaces importantes en blé.

En revanche les sols S2, S4 et S5 portent peu ou pas de culture.

Annexe 4.

Précisions sur les projections climatiques utilisées

1.1 D’OÙ VIENNENT LES PROJECTION CLIMATIQUES ?

PRÉSENTATION GÉNÉRALE

Les scénarios de changement climatique sont produits par la communauté scientifique, suivant la démarche générale suivante :

- ▶ Etape 1 : Construction de scénarios d'émission et/ou de concentration en gaz à effet de serre. Ces scénarios sont les résultantes de facteurs socio-économiques à considérer à l'échelle du globe : démographie, choix énergétique, croissance économique, politiques agricoles, ...
- ▶ Etape 2 : Modélisation des changements climatiques avec des modèles globaux (planétaires) à large maille (quelques centaines de km). Ces modèles (Global Climate Models – GCM) simulent le système global de circulation atmosphérique (avec ses interactions végétation-sols/océans/atmosphère) et l'impact des gaz à effet de serre sur ce système.
- ▶ Etape 3 : Descente d'échelle (ou Downscaling). Il s'agit d'obtenir, à partir des données de sortie des modèles globaux, par diverses méthodes possibles, des résultats de projections climatiques à une échelle plus fine, permettant une meilleure représentation du climat local, et compatible avec les objets sur lesquels on va étudier les impacts du changement climatique. La figure ci-après illustre le principe de la descente d'échelle.

Une projection climatique est donc la résultante d'un scénario de gaz à effet de serre, d'un modèle climatique, et d'une méthode de descente d'échelle. En conséquence, il existe dans la littérature, à l'échelle mondiale, un grand nombre de projections climatiques.

Ces projections peuvent indiquer des évolutions différentes, car les hypothèses considérées (par exemple l'évolution de la concentration de CO₂) sont variables, et les modèles ne rendent pas parfaitement compte des processus physiques en jeu. C'est à l'origine de très fortes incertitudes dans les projections climatiques.

Il n'est pas possible de connaître les modèles les plus fiables, ni les hypothèses les plus justes. En conséquence, la méthode classique consiste à utiliser plusieurs projections climatiques dans les études d'impact. L'ensemble des résultats obtenus donne une image de plusieurs futurs possibles.

Figure 4 : Scénarios de gaz à effet de serre proposés par le rapport IPCC 2007 (AR4)

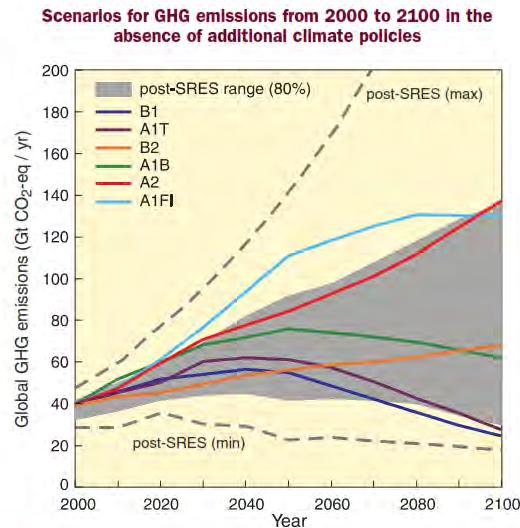
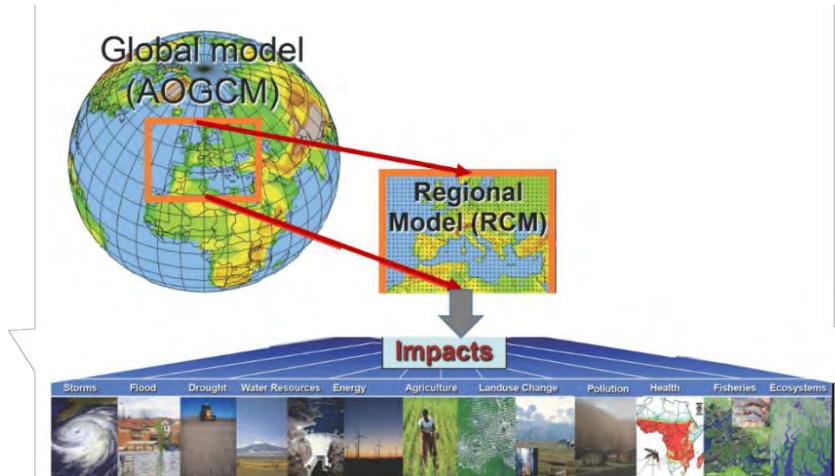


Figure 3.1. Global GHG emissions (in $\text{Gt CO}_2\text{-eq per year}$) in the absence of additional climate policies: six illustrative SRES marker scenarios (coloured lines) and 80th percentile range of recent scenarios published since SRES (post-SRES) (gray shaded area). Dashed lines show the full range of post-SRES scenarios. The emissions include CO_2 , CH_4 , N_2O and F-gases. {WGIII 1.3, 3.2, Figure SPM.4}

Figure 5 : Descente d'échelle des simulations climatiques issues des GCM - principe



1.2 CHOIX DES PROJECTIONS CLIMATIQUES POUR L'ÉTUDE

DONNÉES EXISTANTES SUR LA ZONE D'ÉTUDE

Les modèles climatiques (**GCM**) permettent de simuler le climat sur l'ensemble du globe. Ainsi il est possible d'accéder à des résultats de ces simulations climatiques à grandes mailles sur la zone d'étude, à des formats variables. A chaque rapport du GIEC (IPCC), un ensemble de projections climatiques issues de différents GCM est publié.

Actuellement, deux grands jeux de données sont souvent utilisés par la communauté scientifique :

- Les simulations GCM du GIEC 2007 (AR4),

-
- ▶ Les simulations GCM du GIEC 2013 (AR5).

De façon simplifiée, ces simulations diffèrent pour deux raisons :

- ▶ Les modèles climatiques ont été affinés au cours du temps ;
- ▶ Les scénarios de gaz à effet de serre ne sont pas les mêmes pour AR4 et pour AR5.

Des projections issues des GCM sont disponibles sur le globe pour AR4 et AR5. Cependant, il est préférable d'utiliser les projections climatiques résultantes de l'étape de descente d'échelle, théoriquement plus fiables, car elles prennent en compte les spécificités régionales (reliefs, etc.).

Sur le secteur d'étude (Russie-Ukraine-Kazakhstan), il n'a pas été identifié à ce stade de données publiques issues d'un travail de descente d'échelle sur les simulations AR5. Des travaux sont en cours dans le cadre du programme de recherche CORDEX⁹.

En revanche, des travaux de descente d'échelle ont été produits sur la base des simulations AR4, et sont publiées sur le site de la Banque Mondiale. Il s'agit de données prétraitées et lisibles sous SIG, et donc aisément utilisables pour une étude d'impact. Trois scénarios de gaz à effet de serre (A1B, A2, B1) sont disponibles, ainsi que 8 à 9 modèles climatiques globaux.

En conséquence, il est proposé d'utiliser ce jeu de données comme base de calcul pour la présente étude.

1.3 QUE DISENT LES MODÈLES DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES EN RUSSIE, UKRAINE, KAZAKHSTAN DANS LES DÉCENNIES À VENIR ? PREMIER APERÇU

Le présent paragraphe donne un aperçu des changements climatiques calculés par quelques modèles, sous la forme d'exemples.

Les figures ci-dessous montrent des résultats de plusieurs modèles :

- ▶ sur les précipitations du mois de juin
- ▶ et sur les températures de mars,

entre 1961-1990 et 2046-2065, au Kazakhstan.

⁹ Des échanges avec les climatologues en charge des simulations CORDEX sur l'Asie Centrale ont été initiés. A ce stade, les données climatiques n'ont pas été publiées. Une collaboration serait possible avec les climatologues, mais il est probable que les données pouvant être échangées nécessiterait un pré-traitement important, afin de pouvoir générer des projections climatiques moyennes sur les zones d'étude. Une collaboration d'ordre qualitative (voir chapitre **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) nous paraît plus appropriée dans le cadre de la présente étude.

Figure 6 : Changements possibles des précipitations moyennes de juin au Kazakhstan pour 3 modèles climatiques, entre 1961-1990 et 2046-2065

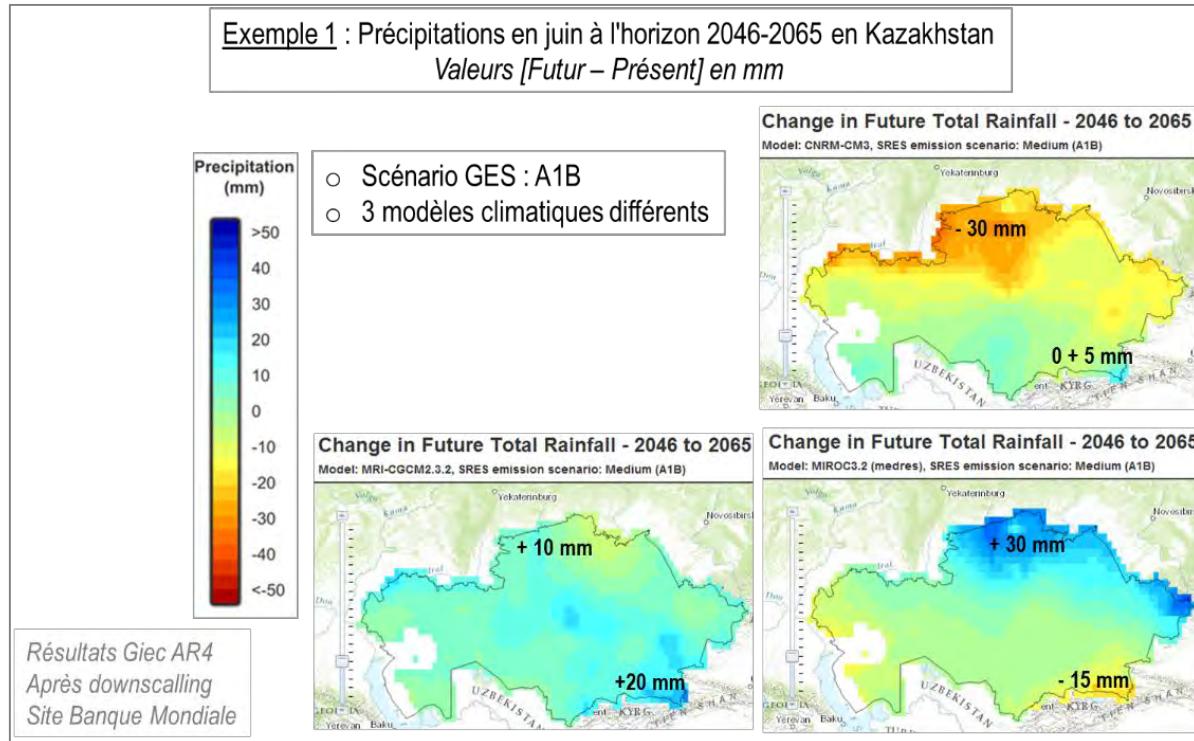
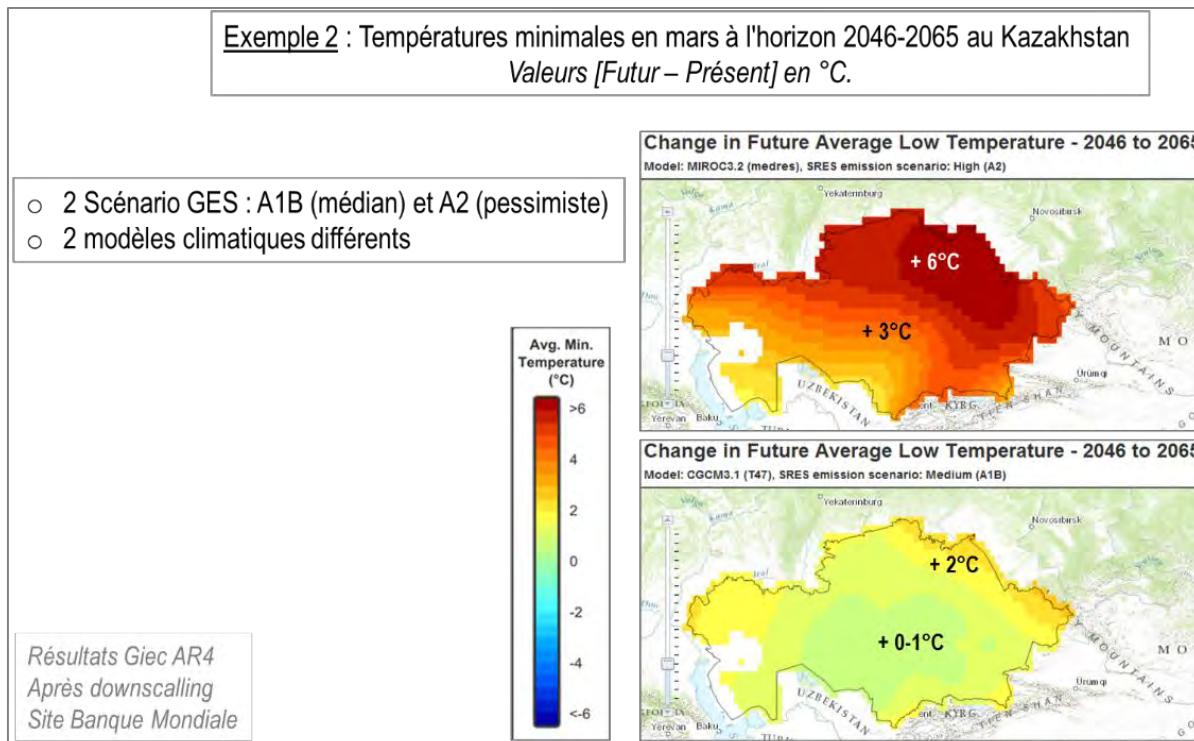


Figure 7 : Changements possibles des températures minimales au Kazakhstan pour 2 modèles climatiques, entre 1961-1990 et 2046-2065



Ces figures permettent d'illustrer un constat qui peut être généralisé à l'ensemble du territoire d'étude (Russie-Ukraine-Kazakhstan) et pour les différentes variables :

- ▶ **Les modèles climatiques ne permettent pas de connaître avec précision l'augmentation des températures à venir.**

Exemple : +2 à +6° en mars dans le nord du Kazakhstan

- ▶ **Les modèles climatiques ne permettent pas de statuer avec fiabilité sur les changements de précipitations à venir.**

Exemple : -30 mm à +10mm en juin dans le nord du Kazakhstan

Plus précisément, selon les modèles climatiques, les simulations peuvent indiquer, pour un territoire donné et une saison donnée, des baisses ou des hausses de précipitations, d'amplitude modérée à élevée.

- ▶ **L'incertitude sur les projections climatiques est très élevée.** L'écart entre les résultats des modèles illustre une partie de cette incertitude.

En conséquence, on peut retenir que :

- ▶ La température va probablement augmenter sur le territoire, mais il n'est pas possible de connaître l'amplitude de cette augmentation : il est donc préférable d'étudier plusieurs scénarios d'augmentation.
- ▶ En l'état des connaissances actuelles, et compte tenu de l'incertitude des modèles climatiques, nous sommes incapables de donner une projection des précipitations à l'horizon 2050 sur la zone d'étude, même en tendance.

1.4 COMMENT PRENDRE EN COMPTE CES DONNÉES DANS LA PRÉSENTE ÉTUDE ? CHOIX MÉTHODOLOGIQUES POUR LA MISE EN PLACE DE SCÉNARIOS

1.4.1 Rappel de l'objectif

Il s'agit ici de mettre en place une méthode pour générer des données d'entrée climatiques pour le modèle de croissance AQUACROP sur la zone d'étude, en conditions futures possibles.

L'ensemble de l'analyse étant menée à l'échelle mensuelle, ces données seront fournies à cette échelle de temps. Les variables climatiques nécessaires pour le modèle AQUACROP sont les suivantes :

- ▶ Précipitations mensuelles ;
- ▶ Evapotranspiration mensuelle ;
- ▶ Température minimale mensuelle ;
- ▶ Température maximale mensuelle.

1.4.2 Echelles spatiales et temporelles

UTILISER TOUTE LA RÉSOLUTION SPATIALE ET TEMPORELLE N'EST PAS POSSIBLE DANS LE CADRE DE CETTE ÉTUDE

Théoriquement, la méthode la plus fine de construction de scénarios climatiques pourrait être la suivante :

- ▶ Considérer chaque pixel de la zone d'étude (les projections climatiques sont définies sur des mailles de 0.5° par 0.5°, soit de l'ordre de 800 km², aux latitudes considérées).
- ▶ Sur chaque pixel, extraire la chronique climatique historique, puis exécuter Aquacrop sur cette chronique. On en déduit ainsi la production agricole historique sur le pixel.
- ▶ Sur chaque pixel, extraire les chroniques climatiques passées et futures issues des modèles, puis exécuter Aquacrop sur ces chroniques. On en déduit ainsi l'évolution possible de la production agricole sur le pixel.
- ▶ Réaliser cela pour plusieurs modèles climatiques et plusieurs scénarios de gaz à effet de serre, afin de prendre en compte un ensemble de futurs possibles (voir paragraphe 1.1).
- ▶ Synthétiser les résultats.

Sur une zone de cette superficie, cela représenterait environ 200 000 pixels, 10 modèles climatiques (par exemple), 3 chroniques de 20 ans à extraire par modèle : Cela induirait de réaliser plusieurs centaines de millions d'itérations du modèle Aquacrop. Ce n'est pas réalisable dans le cadre de la présente étude.

Aussi, nous proposons la méthode suivante afin de simplifier les analyses au niveau spatial et temporel tout en prenant en compte une part de l'incertitude.

SIMPLIFICATION SPATIALE

Nous proposons de travailler à l'échelle des grandes zones climatiques définies dans l'Annexe 2.

SIMPLIFICATION TEMPORELLE

Choix de l'horizon temporel de prospective : milieu de siècle

Pour étudier des changements du climat, il est nécessaire d'utiliser une approche statistique qui reflète les aléas interannuels du climat, c'est-à-dire de travailler sur une période d'au moins 20 ans.

Les scénarios diffusés par la Banque Mondiale correspondent à la période « milieu de siècle » : 2046-2065. Des scénarios pour la période fin de siècle (2081-2100) sont également disponibles.

Nous proposons de considérer pour la présente étude la période milieu de siècle 2046-2065.

L'étude d'une période plus proche (telle que 2030) n'apporterait pas de plus-value significative. En effet, les modèles climatiques ne sont pas meilleurs à l'horizon 2030, par rapport à 2050. En outre, il s'agit d'une période très proche, il est donc plus difficile de détecter les modifications attribuables au changement climatique global.

Choix de la Période de référence : 1971-1990

Il est nécessaire de définir une période de référence, correspondant aux conditions climatiques « passées récentes », afin de pouvoir évaluer l'évolution possible des rendements, entre un état futur et un état passé de référence.

Nous proposons de retenir comme période de référence la période 1971-1990.

En conséquence, nous proposons d'étudier des changements possibles de rendement et de production entre 1971-1990 et 2046-2065.

1.4.3 Méthode de construction des scénarios climatiques (Famille 1)

Nous exposons ici les précisions associées aux scénarios de la « Famille de Simulation 1 » présentés dans le corps du rapport (chapitre 2.3)

DES SCÉNARIOS CLIMATIQUES À PRÉCIPITATIONS CONSTANTES

Comme présenté précédemment, les simulations climatiques existantes ne permettent pas de donner une projection des précipitations à l'horizon 2050 sur la zone d'étude, même en tendance (housse ou baisse).

En conséquence, nous avons choisi de construire deux scénarios de climat futur possibles pour lesquels nous avons considéré seulement des changements de températures et d'ETP, sans prendre en compte des changements possibles de précipitations.

CHOIX DES SIMULATIONS POUR LA TEMPÉRATURE ET L'ETP : 2 SCÉNARIOS HAUT ET BAS

De très nombreuses projections climatiques existent et peuvent être utilisées. Leurs valeurs diffèrent, selon les hypothèses prises en compte par les climatologues, et selon les modèles utilisés.

Comme déjà évoqué, il n'est pas possible de déterminer quelles sont les projections les plus fiables, mais il est nécessaire de prendre en compte plusieurs projections, afin de rendre compte de ces incertitudes, et de considérer plusieurs futurs possibles.

De manière simplifiée, et comme déjà explicité plus haut, les projections climatiques sont la résultante de :

- ▶ Un scénario d'émission de gaz à effet de serre (GES) ;
- ▶ Un modèle climatique global (GCM).

Les données de climat futur possible diffusées par la Banque Mondiale sont disponibles pour 9 modèles climatiques, et 3 scénarios de gaz à effet de serre (B1 ; A1B et A2), soit 27 projections.

Nous proposons de considérer les résultats des 9 modèles climatiques croisés avec 2 scénarios GES : A1B et A2. Ces deux scénarios sont considérés respectivement comme médians et pessimistes. Le troisième scénario (B1) est considéré comme très optimiste.

Sur la base de 9 modèles climatiques, intégrant 2 scénarios GES, nous disposons de 17 projections climatiques¹⁰.

Pour chacune de ces projections, nous disposons des paramètres suivants : l'évolution de la température minimale moyenne, l'évolution de la température maximale et l'évolution de l'évapotranspiration moyenne sur la période 2046-2065.

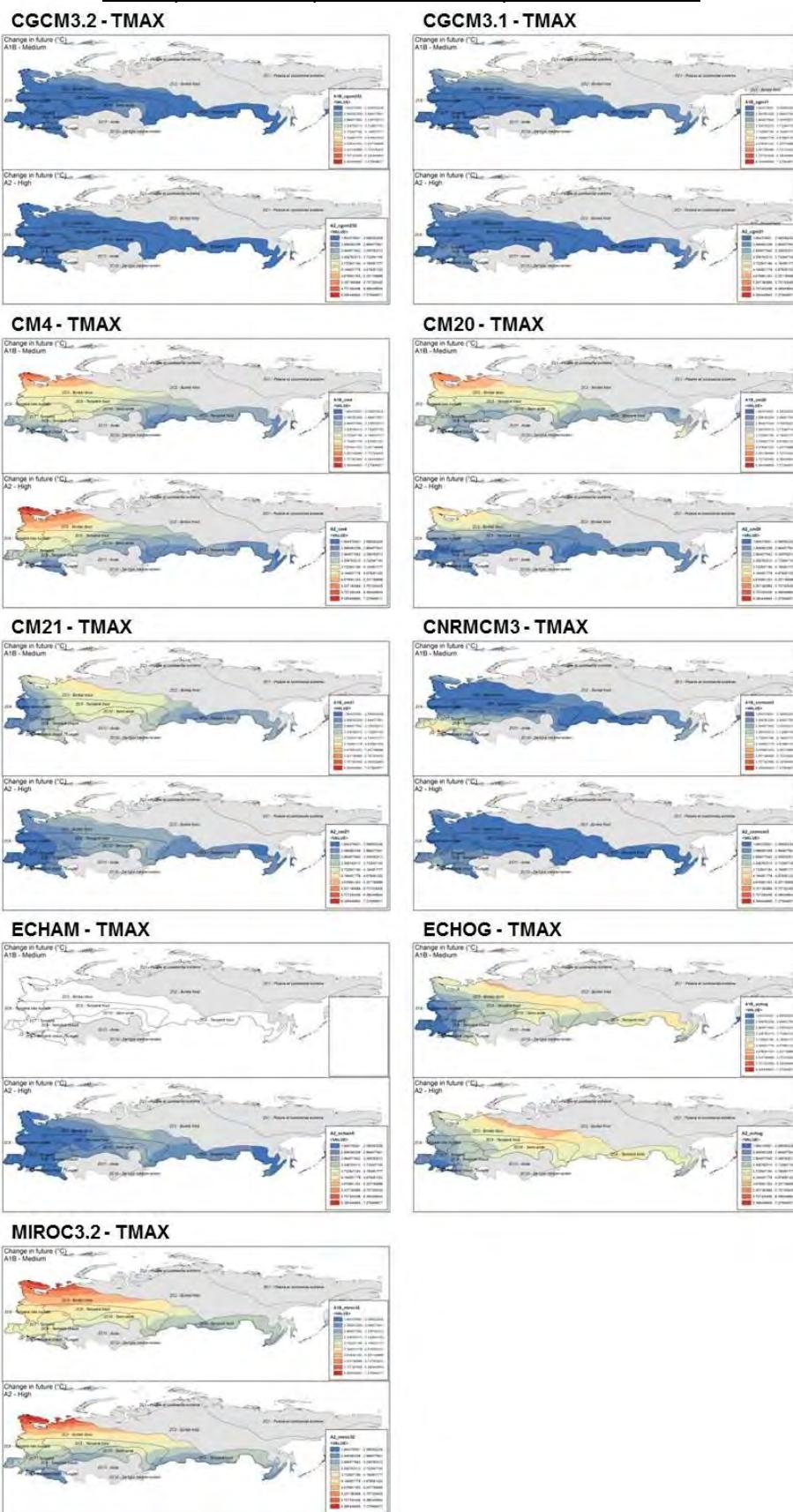
Nous proposons de retenir 2 projections climatiques reflétant la tendance d'évolution médiane (scénario bas) et la tendance d'évolution pessimiste (scénario haut) pour les paramètres de température et d'évapotranspiration. La sélection des 2 projections a été effectuée à partir de l'évolution de la température maximale moyenne (voir Figure 8 ci-dessous).

¹⁰ La projection climatique pour le GCM ECHAM et le GES A1B n'est pas disponible.

Nous proposons ainsi de retenir les projections suivantes :²

- **Projection 1 : Scénario GES A2 modèle climatique CGCM3.1 (T47). L'évolution future de Tmax est estimée à +2.4°C à l'horizon 2065 sur la zone d'étude. Scénario Bas ;**
- **Projection 2 : Scénario GES A1B modèle climatique Miroc3.2 (medres). L'évolution future de Tmax est estimée à + 4.3°C à l'horizon 2065 sur la zone d'étude. Scénario Haut.**

Figure 8 : Evolution de la température maximale moyenne sur la zone d'étude selon les 17 projections climatiques de la Banque Mondiale sur la période 2046-2065.



On retient ainsi :

- ▶ 2 simulations passées pour la température et l'ETP, issues des deux modèles climatiques sélectionnés ;
- ▶ 2 simulations futures pour la température et l'ETP, issues des deux modèles climatiques et scénarios de gaz à effet de serre sélectionnés.

En outre, il faut noter que :

- ▶ Les modèles climatiques ne reproduisent pas le climat actuel avec exactitude (incertitude sur le climat passé) ;
- ▶ En conséquence, comparer une simulation climatique future (d'un modèle) directement avec les observations climatiques passées ne permet pas de prendre en compte ce biais sur le climat passé.
- ▶ En conséquence, l'état de l'art indique qu'il est souvent préférable de comparer entre elles deux simulations climatiques passées et futures issues d'un même modèle, afin de rendre compte des évolutions possibles. Cela permet de s'affranchir d'un biais.

Ainsi, nous travaillerons sur les simulations climatiques passées et futures retenues pour les températures et ETP, et étudierons l'écart des rendements passés et futurs résultants.

1.4.4 Synthèse des choix méthodologiques

En résumé, nous retenons les choix méthodologiques suivants pour la construction des simulations climatiques (*Famille 1 – cf. chapitre 2.3*) :

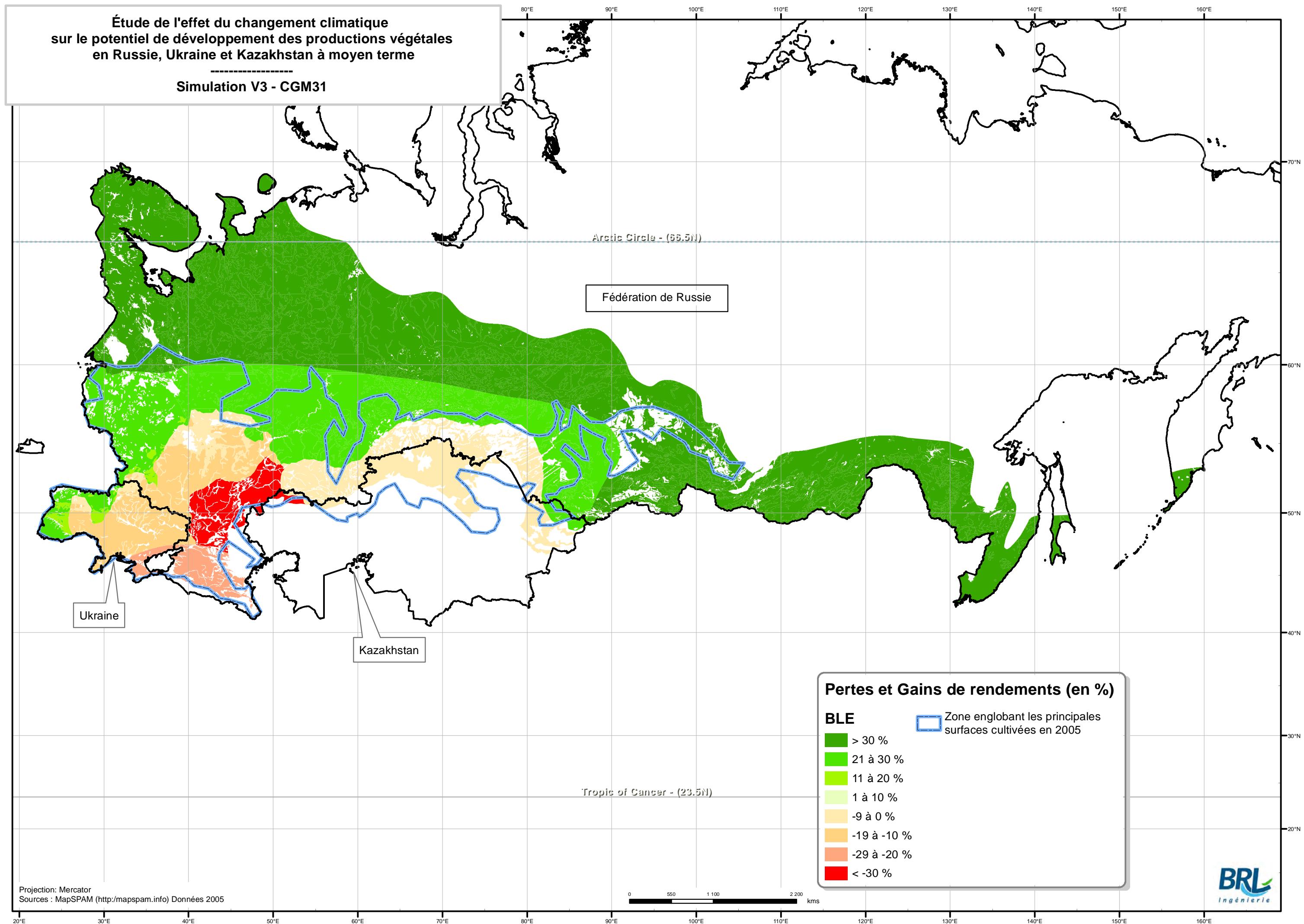
- ▶ Utilisation des projections climatiques issues de l'**AR4** (IPCC 2007), publiées par le site de la Banque Mondiale ;
- ▶ Analyse moyenne menée à l'échelle des zones climatiques ;
- ▶ Choix de la période de référence (conditions actuelles) : **1971-1990** ;
- ▶ Choix de l'horizon temporel (conditions futures possibles) : **2046-2065** ;
- ▶ Choix de considérer **de considérer uniquement des changements de température et ETP**, compte tenu des incertitudes sur les précipitations. Nous définissons ainsi des chroniques climatiques comme suit :
 - En « climat passé » :
 - Des simulations climatiques passées issues de modèles pour la température et l'ETP ;
 - Les données historiques pour les précipitations ;
 - En « climat futur » :
 - Des simulations climatiques futures issues de modèles pour la température et l'ETP ;
 - Les données historiques pour les précipitations (c'est-à-dire les mêmes que celles considérées pour le climat présent).
- ▶ Pour les **températures et l'ETP**, choix de considérer **deux projections** futures pour l'ETP et les températures, parmi l'ensemble des projections existantes :
 - Projection 1 : Scénario GES A2 modèle climatique CGCM3.1 (T47) ;
 - Projection 2 : Scénario GES A1B modèle climatique Miroc3.2 (medres).

Annexe 5.

Cartes d'impact du changement climatique sur le rendement en fonction des sols et des ZC

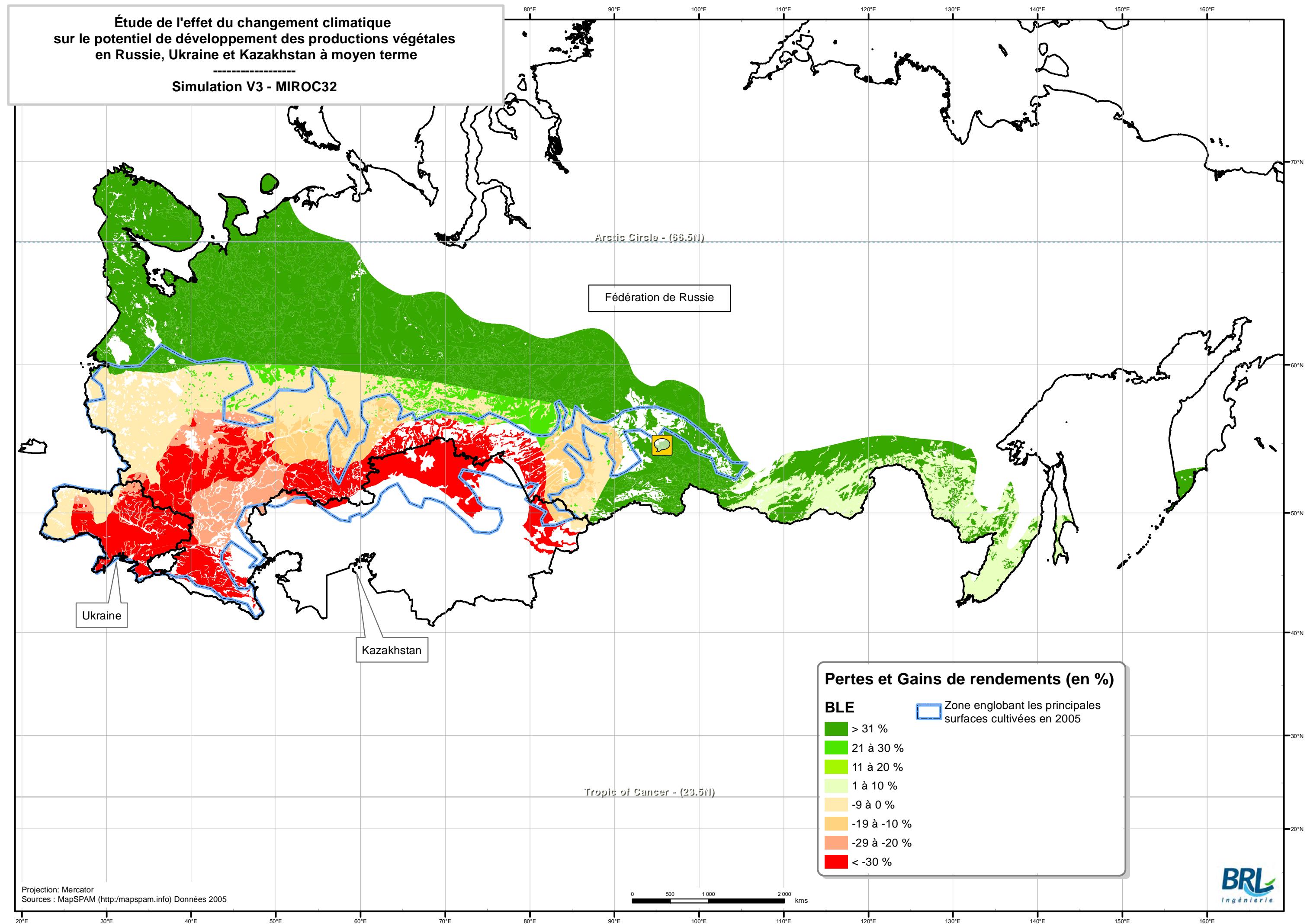
Étude de l'effet du changement climatique
sur le potentiel de développement des productions végétales
en Russie, Ukraine et Kazakhstan à moyen terme

Simulation V3 - CGM31



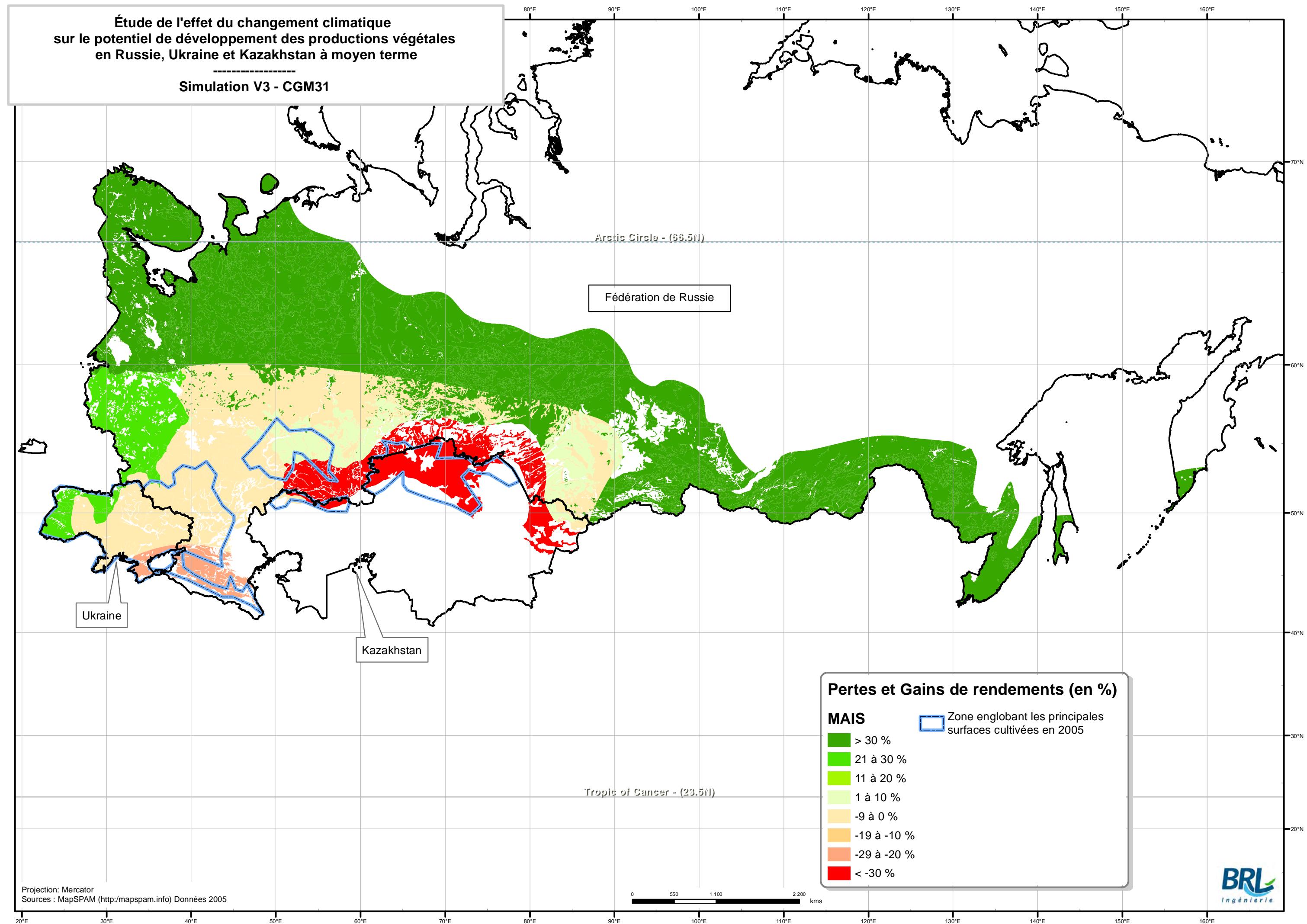
Étude de l'effet du changement climatique
sur le potentiel de développement des productions végétales
en Russie, Ukraine et Kazakhstan à moyen terme

Simulation V3 - MIROC32



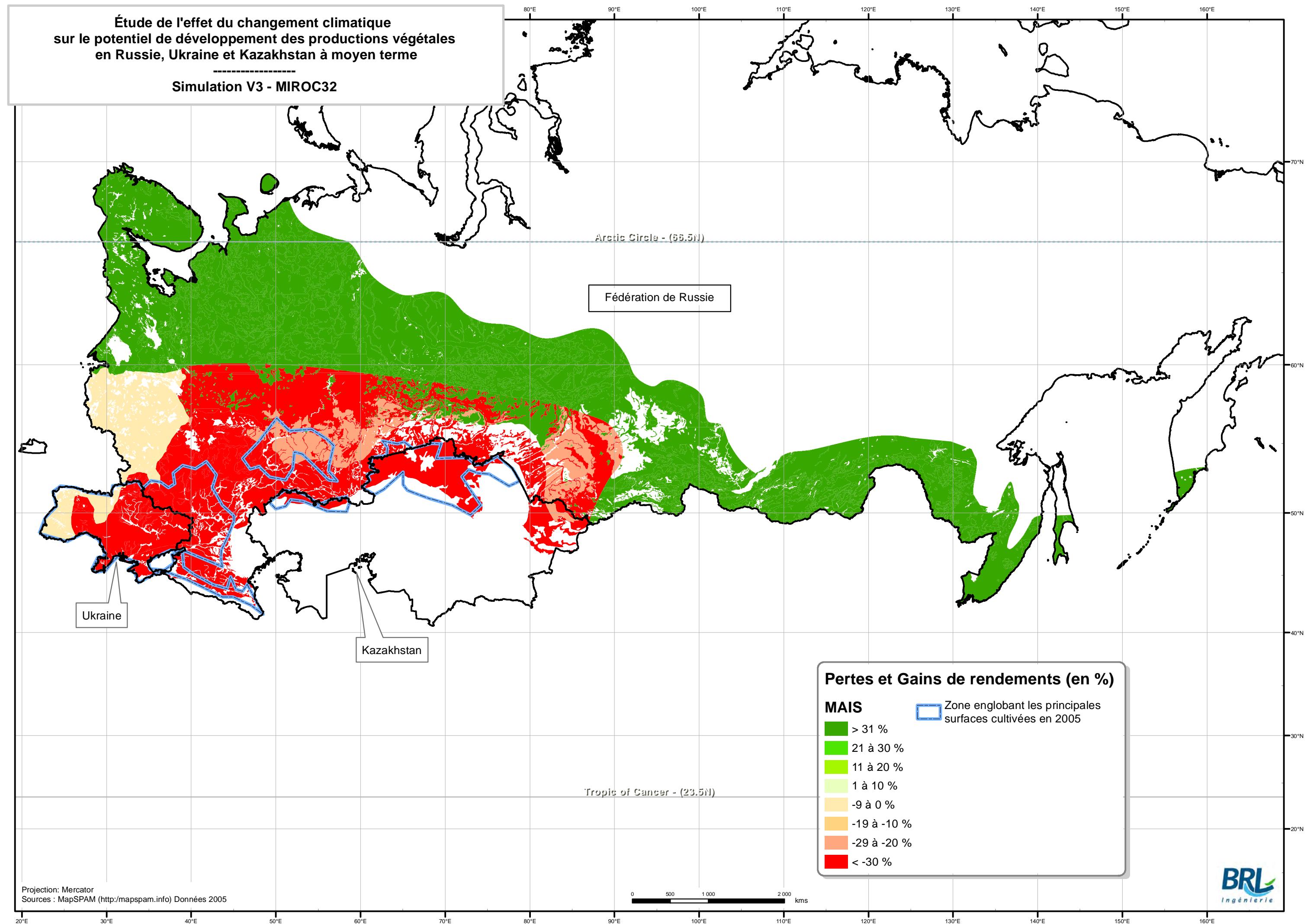
Étude de l'effet du changement climatique
sur le potentiel de développement des productions végétales
en Russie, Ukraine et Kazakhstan à moyen terme

Simulation V3 - CGM31



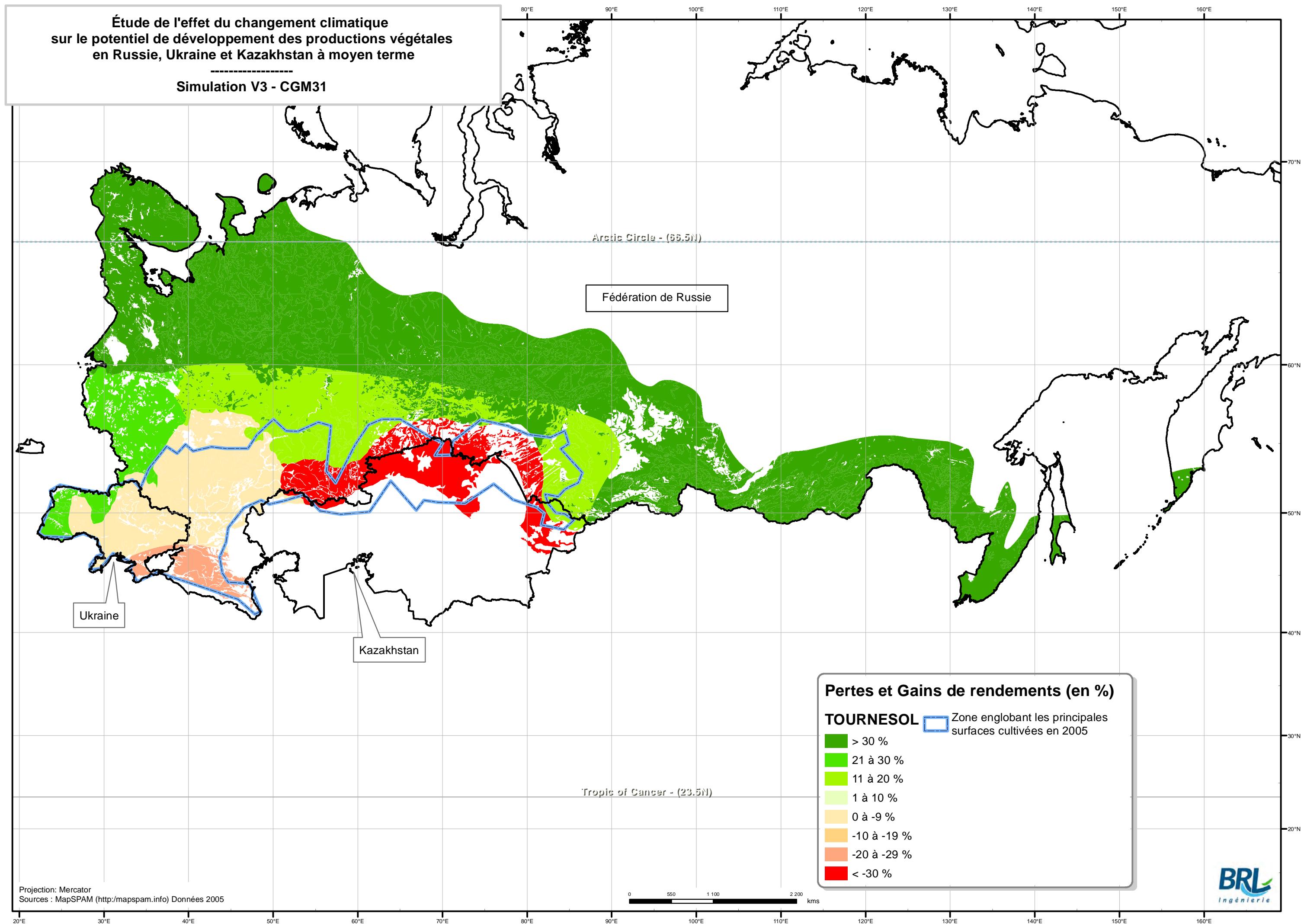
Étude de l'effet du changement climatique
sur le potentiel de développement des productions végétales
en Russie, Ukraine et Kazakhstan à moyen terme

Simulation V3 - MIROC32



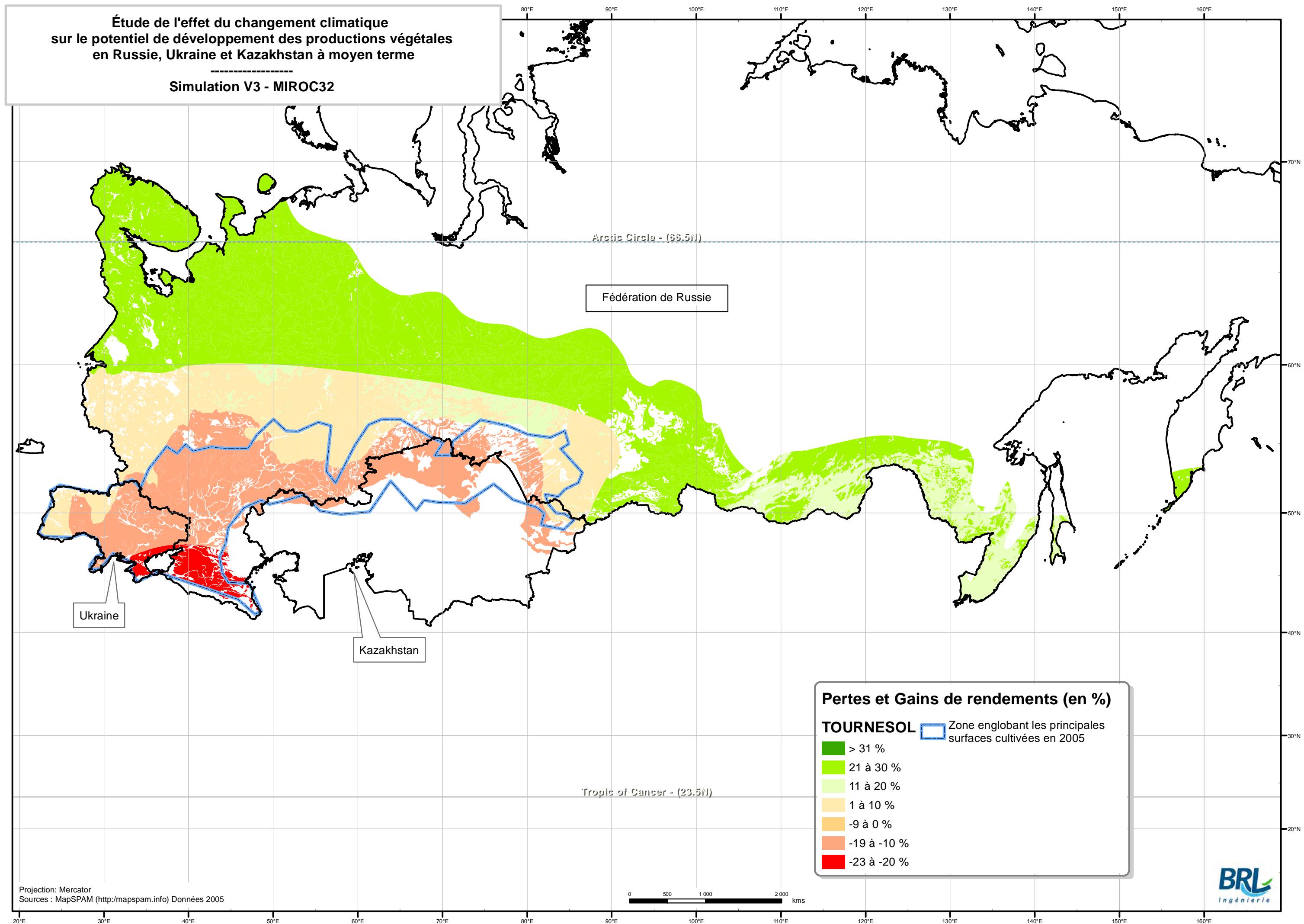
Étude de l'effet du changement climatique
sur le potentiel de développement des productions végétales
en Russie, Ukraine et Kazakhstan à moyen terme

Simulation V3 - CGM31



Étude de l'effet du changement climatique
sur le potentiel de développement des productions végétales
en Russie, Ukraine et Kazakhstan à moyen terme

Simulation V3 - MIROC32

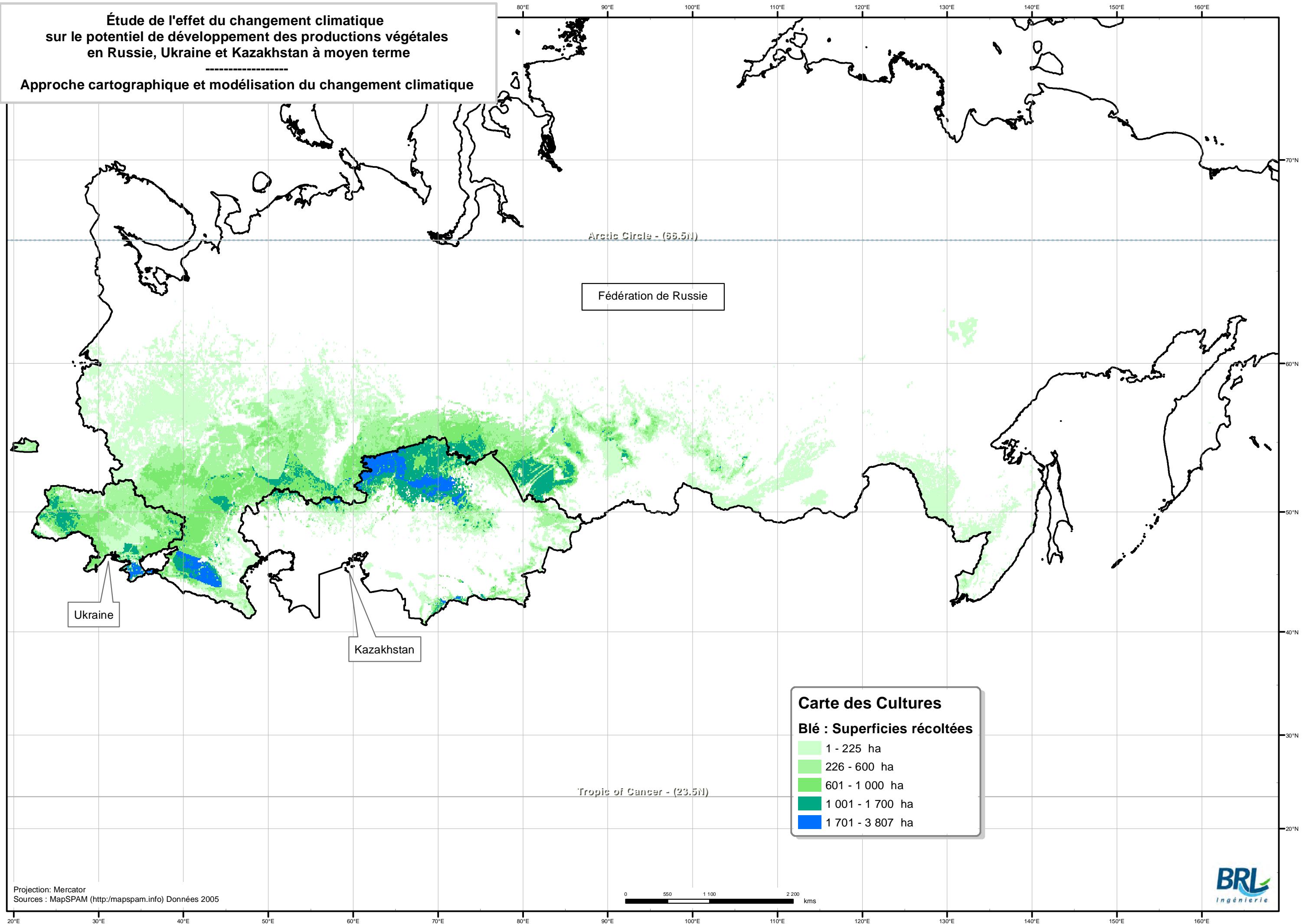


Annexe 6.

Aire de répartition du blé, du maïs et du tournesol en 2005

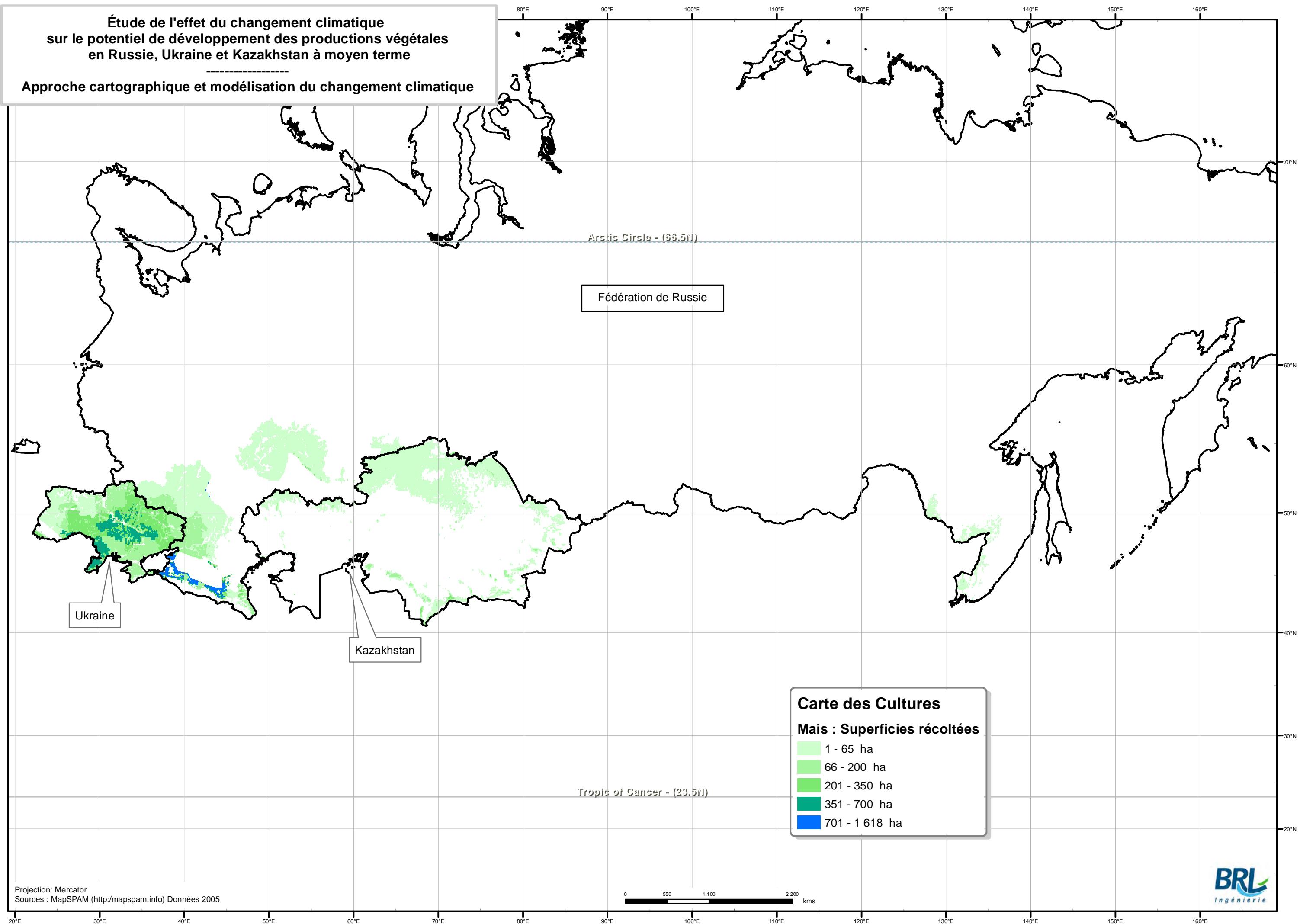
**Étude de l'effet du changement climatique
sur le potentiel de développement des productions végétales
en Russie, Ukraine et Kazakhstan à moyen terme**

Approche cartographique et modélisation du changement climatique



**Étude de l'effet du changement climatique
sur le potentiel de développement des productions végétales
en Russie, Ukraine et Kazakhstan à moyen terme**

Approche cartographique et modélisation du changement climatique



**Étude de l'effet du changement climatique
sur le potentiel de développement des productions végétales
en Russie, Ukraine et Kazakhstan à moyen terme**

Approche cartographique et modélisation du changement climatique

