

Modélisation de l'adaptation aux changements climatiques dans un modèle économique intégré

Rapport Final

Groupe de Recherche en Économie et Management de l'Environnement
Sur mandat de l'Office Fédéral de l'Environnement (OFEV)



28 août 2012

Mentions légales

Mandant: Office Fédéral de l'Environnement (OFEV), Division Climat, CH—3003 Berne
L'OFEV est un office du Département Fédéral de l'Environnement, des Transports, de l'Énergie et de la Communication (DETEC)

Mandataire: Groupe de Recherche en Économie et Management de l'Environnement (REME) de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Auteurs: Anne-Kathrin Faust, Camille Gonseth, Marc Vielle (tous REME).

Comité de pilotage: Andrea Burkhardt, Andreas Götz, Thomas Stadler (tous OFEV).

Groupe d'accompagnement: Hugo Aschwanden, Paul Filliger, Roland Hohmann, Pamela Köllner-Heck, Silvia Ruprecht-Martignoli (tous OFEV), Beat Goldstein, Lukas Gutzwiller (tous Office fédéral de l'énergie), Daniel Felder (Office fédéral de l'agriculture), Edith Bernhard, Davide Codoni, Thomas Roth (tous Secrétariat d'Etat à l'économie).

Remarque: La présente étude a été réalisée sur mandat de l'OFEV. Seul le mandataire porte la responsabilité de son contenu.

Table des matières

Table des matières	3
Liste des tableaux	7
Table des figures	11
Résumé	14
Remerciements	19
1 Introduction	19
2 Le secteur de l'eau	22
2.1 Captage et consommation d'eau en Suisse	22
2.2 Changements climatiques et les ressources en eau	22
2.3 Impacts sur le secteur de l'eau et mesures d'adaptation	23
2.4 Représentation du secteur de l'eau potable et de la ressource en eau dans GEMINI-E3	25
2.4.1 Les ressources en eau brute dans le modèle	25
2.4.2 Le secteur de distribution d'eau potable	27
2.4.3 La structure de production du secteur de distribution d'eau potable et des autres secteurs industriels qui utilisent de l'eau brute	28
3 L'agriculture	30
3.1 Positionnement dans l'économie suisse	30
3.2 Types et évaluations des impacts des changements climatiques	31
3.3 Options d'adaptation face aux changements climatiques	31
3.4 Représentation du secteur de l'agriculture dans GEMINI-E3	33
3.4.1 Désagrégation sectorielle de l'agriculture	33
3.4.2 La structure de production des secteurs agricoles	35
4 Le secteur de l'énergie	36
4.1 Introduction	36
4.2 L'offre d'énergie	37

4.2.1	L'hydraulique	37
4.2.2	Le nucléaire	39
4.2.3	Les centrales thermiques classiques	40
4.2.4	Éolien, photovoltaïque et biomasse	40
4.2.5	Énergie fossile	41
4.3	La demande d'énergie	41
4.3.1	Les ménages	42
4.3.2	L'industrie	43
4.3.3	Les services et l'agriculture	43
4.3.4	Les transports	43
4.4	Les importations et exportations d'énergie	43
4.5	Le transport d'énergie	44
4.6	Représentation de la production d'électricité dans GEMINI-E3	44
4.7	Les mesures d'adaptation face au changement climatique	45
5	Le tourisme	46
5.1	Définition et poids dans l'économie suisse	46
5.2	Types et évaluations des impacts des changements climatiques	47
5.3	L'adaptation aux changements climatiques dans le tourisme alpin d'hiver	48
5.3.1	Les mesures d'adaptation envisageables	48
5.3.2	L'enneigement artificiel	50
5.4	Le marché mondial du ski	52
5.5	Représentation du tourisme dans GEMINI-E3	53
5.6	Calibration des segments touristiques	55
5.6.1	Sources utilisées pour créer le secteur du tourisme	56
5.6.2	Description des trois segments touristiques en 2001	59
5.6.3	Rémunération de la neige naturelle	62
6	Les autres modifications apportées au modèle	65
6.1	Le découpage géographique	65
6.2	La fonction de consommation	65
7	La régionalisation des changements climatiques	67

8	Le compte de référence	68
8.1	Le prix des énergies	69
8.2	Les hypothèses de croissance économique	69
8.3	La production d'électricité en Suisse	69
8.4	Les consommations d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre	71
9	Simulations de l'impact des changements climatiques	75
9.1	Introduction des impacts du changement climatique sur la ressource en eau brute dans le modèle	75
9.1.1	Variations de la ressource en eau brute	75
9.1.2	Impacts économiques des variations de la ressource en eau brute : les scénarios climatiques	77
9.1.3	Impacts économiques des variations de la ressource en eau brute : la capacité endogène d'adaptation	80
9.1.4	Impacts économiques des variations de la ressource en eau brute : l'adaptation exogène	83
9.2	Impacts des changements climatiques sur le secteur agricole	85
9.2.1	Impacts sur les rendements	85
9.2.2	Irrigation et variations des ressources en eau brute	91
9.2.3	Impacts économiques pour le secteur agricole	92
9.3	Impacts des changements climatiques sur la consommation d'énergie	95
9.3.1	Méthode des degrés-jours et évaluation de la demande d'énergie	95
9.3.2	Evolution des HDD et des CDD	100
9.3.3	Impacts économiques des nouveaux besoins de chauffage et de climatisation	103
9.3.4	Résultats obtenus avec les scénarios climatiques CH2011	106
9.4	Impacts des changements climatiques sur la production d'électricité	109
9.4.1	Impacts sur la production des centrales nucléaires	110
9.4.2	Impacts économiques de la baisse de la production d'électricité thermique	114
9.4.3	Impacts sur la production hydraulique	115
9.4.4	Impacts économiques de la baisse de la production d'électricité hydraulique	116
9.5	L'impacts net des changements climatiques sur le secteur de l'énergie	117
9.6	Impacts des changements climatiques sur le secteur du tourisme	118

9.6.1	Variation de la dotation en neige	118
9.6.2	Impacts économiques de la baisse de l'enneigement naturel	124
9.6.3	Analyse de sensibilité	128
10	Conclusion	130
	Références	134
	Annexes	142
A	Personnes contactées et/ou auditionnées	143
B	La nouvelle nomenclature sectorielle	144
C	Secteur agricole	145
C.1	Résultats des régressions des modèles de rendement de trois cultures	145
C.2	Evolution des rendements agricoles en Suisse à l'horizon 2090	147
D	Secteur de l'énergie	150
D.1	Stations MétéoSuisse et poids associés	150
D.2	Calculs des HDD sur la base des scénarios CH2011	150
D.3	Calculs des CDD sur la base des scénarios CH2011	152
E	Secteur du tourisme	155
E.1	Le marché mondial du ski	155
E.2	Dépenses journalières moyennes des visiteurs	157

Liste des tableaux

1	Mesures d'adaptation envisageables dans le secteur de l'eau.	25
2	Mesures d'adaptation envisageables pour les producteurs de biens agricoles et leur prise en compte dans le modèle GEMINI-E3.	32
3	Secteurs agricoles détaillés dans la base de données du GTAP	33
4	Choix des sous-secteurs pour l'agriculture.	34
5	Consommation finale d'énergie en Suisse par secteur. (Source : [3, 5]) . . .	41
6	Consommation finale d'énergie en Suisse par énergie. (Source : [3, 5]) . . .	42
7	Mesures d'adaptation envisageables dans le secteur de l'énergie	46
8	Mesures d'adaptation envisageables côté offre face à la baisse de l'enneigement naturel. (Source : adapté de [91])	49
9	Mesures d'adaptation envisageables côté demande face à la baisse de l'enneigement naturel. (Source : adapté de [91])	49
10	Longueur de pistes de ski (en km) pouvant être enneigées artificiellement dans différentes régions en 2001 et 2005. (Source : [105, 106], Organisations faîtières des remontées mécaniques bernoises et grisonnes)	50
11	Structure des coûts annuels moyens de l'enneigement artificiel en Suisse pour trois classes de sociétés de remontées mécaniques (saison 2007/2008). (Source : [16])	51
12	Elasticités de substitution employées dans la fonction de production des segments du tourisme d'hiver	54
13	Dépenses touristiques des Suisses à l'étranger. (Source : La balance touristique de la Suisse, OFS.)	57
14	Elasticités de substitution employées pour les segments du tourisme d'hiver dans la fonction de consommation	67
15	Choix de couplages de modèles issus du projet ENSEMBLES avec indication de la période de simulation	67
16	Les variables climatiques extraites d'ENSEMBLES et leurs champs d'application	68
17	Prix des énergies - Compte de référence (\$ 2009)	69
18	Produit intérieur brut mondial par région en millions de \$ 2005 (exprimé aux taux de change du marché), Compte de référence, 1990-2035. (Source : [32])	70
19	Evolution du PIB - Compte de référence - (Taux de croissance annuel moyen)	70
20	Durée d'exploitation des centrales nucléaires. (Source : [21])	70
21	Emission de gaz à effet de serre en MtC-eq - Compte de référence	74

22	Variations des ressources en eau disponibles en Suisse en 2050 par rapport à la période 1980-2009	76
23	Résultats des simulations avec différents scénarios climatiques, variations par rapport au compte de référence	79
24	Résultats des simulations pour l'eau	81
25	Résultats des simulations avec subvention, variations par rapport au compte de référence	85
26	Growing seasons of barley, maize and wheat for Switzerland. (Source : [2], [53] and communication from the Swiss Federal Office for Agriculture) . . .	87
27	Résultats de l'analyse de l'impact des changements climatiques en 2050 sur les rendements du blé, du maïs grain et de l'orge en distinguant les effets liés aux températures de ceux liés aux précipitations.	90
28	Présentation des impacts des changements climatiques pour le secteur "Other agricultural products" en 2050 et 2090.	91
29	Impacts des changements climatiques sur la ressource en eau, variation en 2050.	92
30	Résultats des simulations pour l'agriculture.	94
31	Consommation finale d'énergie des ménages privés en 2001 pour différents usages et selon différents systèmes et agents énergétiques (en PJ). (Source : [61])	96
32	Consommation finale d'énergie du secteur "Services et agriculture" en 2001 pour le chauffage (en PJ). (Source : [61])	96
33	Consommation finale d'énergie du secteur "Industrie" en 2001 pour le chauffage (en PJ). (Source : [61])	97
34	Pourcentages de la surface de sol chauffé du secteur tertiaire partiellement ou totalement climatisés dans un scénario sans changements climatiques. (Source : [9])	99
35	Variation des HDD entre la période de référence 1961-1990 et 2050.	102
36	Variation des CDD entre la période de référence 1961-1990 et 2050.	103
37	Impacts d'une baisse de la demande d'énergie pour le chauffage en 2050* .	105
38	Impacts d'une augmentation de la demande d'électricité pour la climatisation en 2050*	106
39	Impacts des nouveaux besoins de chauffage et de climatisation en 2050* . .	106
40	Calcul des HDD et de leurs variations en 2050 par rapport à la période de référence 1980-2009 sur la base des scénarios CH2011.	107
41	Calcul des CDD et de leurs variations en 2050 par rapport à la période de référence 1980-2009 sur la base des scénarios CH2011.	108
42	Impacts d'une baisse de la demande d'énergie pour le chauffage en 2050 sur la base des scénarios CH2011*	108

43	Impacts d'une hausse de la demande d'énergie pour la climatisation en 2050 sur la base des scénarios CH2011*	109
44	Variations annuelles de la production des centrales nucléaires, par rapport à la période de référence 1980–2009, calculées sur la base des scénarios CH2011.	114
45	Impacts de la baisse de production des centrales thermique en 2050*	115
46	Coefficients de détermination d'un modèle linéaire reliant les variations relatives des débits avec les variations relatives des précipitations pour les différents mois de l'année.	116
47	Variations en pourcent des débits à l'horizon 2050 pour différents scénarios climatiques d'ENSEMBLES.	116
48	Impacts de la baisse de production des centrales hydrauliques en 2050*	117
49	Impacts totaux sur le secteur de l'énergie en 2050*	117
50	Poids attribué pour le projet à chaque mois de la saison d'hiver.	120
51	Variations de la dotation en neige en 2050 et 2090 pour les différentes régions du modèle.	124
52	Six scénarios pour décrire les impacts économiques potentiels ^a d'une baisse de l'enneigement naturel sur le secteur touristique et les ménages suisses en 2050.	125
53	Nouvelle nomenclature sectorielle du modèle GEMINI-E3	144
54	Coefficients estimés par régressions de données historiques et décrivant la sensibilité du rendement du blé, du maïs grain et de l'orge aux conditions climatiques (température et précipitations).	146
55	Résultats de l'analyse de l'impact des changements climatiques en 2090 sur les rendements du blé, du maïs grain et de l'orge en distinguant les effets liés aux températures de ceux liés aux précipitations.	149
56	Calcul des HDD et de leurs variations en 2035 par rapport à la période de référence 1980–2009 sur la base des scénarios CH2011.	151
57	Calcul des HDD et de leurs variations en 2060 par rapport à la période de référence 1980–2009 sur la base des scénarios CH2011.	151
58	Calcul des HDD et de leurs variations en 2085 par rapport à la période de référence 1980–2009 sur la base des scénarios CH2011.	152
59	Calcul des CDD et de leurs variations en 2035 par rapport à la période de référence 1980–2009 sur la base des scénarios CH2011.	153
60	Calcul des CDD et de leurs variations en 2060 par rapport à la période de référence 1980–2009 sur la base des scénarios CH2011.	153
61	Calcul des CDD et de leurs variations en 2085 par rapport à la période de référence 1980–2009 sur la base des scénarios CH2011.	154
62	Le marché du ski dans 25 pays. (Source : adapté de [101])	156

63	Structure des dépenses (hors voyage aller-retour) des visiteurs du canton du Valais, de l'Oberland bernois et des Alpes vaudoises durant la saison d'hiver. (Source : [85, 86, 87])	158
----	---	-----

Table des figures

1	Consommation d'eau brute et potable en Suisse en 2001 en Mios de m^3 . . .	26
2	Arborescence du secteur de la distribution d'eau	29
3	Arborescence de la fonction de production des secteurs industriels où la consommation intermédiaire d'eau est explicitement représentée.	30
4	Valeur ajoutée, pour la Suisse, des 14 sous-secteurs de l'agriculture définis dans la base de données du GTAP — en millions de US\$ de 2001. (Source : GTAP 6)	34
5	Arborescence des secteurs agricoles	36
6	Représentation des flux d'énergie pour la Suisse en 2010 (en TJ). (Source : Statistique globale suisse de l'énergie 2010, Office fédéral de l'énergie) . . .	38
7	Arborescence de la production d'électricité	45
8	Coût moyen du m^3 de neige produite (saison 2007/2008). (Source : [1]) . .	51
9	Evolution des journées-skieurs pour cinq régions du modèle. (Source : Laurent Vanat)	52
10	Arborescence employée pour les deux segments touristiques liés à la pratique des sports d'hiver.	55
11	Consommation liée au tourisme pour différents biens et services. (Source : [12])	56
12	Consommation liée au tourisme par type de visiteurs. (Source : [12])	57
13	Part des trois segments au total des revenus touristiques en 2001.	59
14	Part des trois segments au total des emplois touristiques en 2001 (équivalents plein temps).	60
15	Part des produits touristiques consommés dans le secteur "winter overnight tourism".	60
16	Part des produits touristiques consommés dans le secteur "one-day winter tourism".	61
17	Part des produits touristiques consommés dans le secteur "other forms of tourism".	61
18	Intervalles de confiance à 95% pour la sensibilité des journées-skieurs (figure de gauche) et celle des nuitées hôtelières (figure de droite) au nombre de jours avec un enneigement suffisant. Les estimateurs utilisés ont été les suivants : OLS=Ordinary Least Squares ; RE=Random Effects ; FD=First-Difference ; FE=Fixed Effects.	63
19	Arborescence de la fonction de consommation	66
20	Détail de la branche tourisme	66
21	Production d'électricité en Suisse en TWh	71

22	Consommation mondiale d'énergie en Mtep	72
23	Consommation suisse d'énergie fossile en Mtep	73
24	Emissions mondiales de gaz à effet de serre en GtC-eq	73
25	Comparaison des niveaux d'émission de GEMINI-E3 avec l'exercice EMF22	74
26	Impact du changement climatique sur la ressource en eau.	75
27	Débits en Suisse, périodes 2021-2050 et 2070-2099. Source : projet CCHydro [104], copyright WSL	76
28	Poids obtenus pour l'agriculture en Suisse à partir des données sur la surface de terres arables par commune. (Source : Statistique de la superficie, OFS)	87
29	Estimation de l'impact des changements climatiques sur le rendement de l'orge en Suisse à l'horizon 2050 par rapport à la période de référence 1961–1990 (effets via une modification des températures et des précipitations). .	88
30	Estimation de l'impact des changements climatiques sur le rendement du maïs grain en Suisse à l'horizon 2050 par rapport à la période de référence 1961–1990 (effets via une modification des températures et des précipitations). .	88
31	Estimation de l'impact des changements climatiques sur le rendement du blé en Suisse à l'horizon 2050 par rapport à la période de référence 1961–1990 (effets via une modification des températures et des précipitations). .	89
32	Poids obtenus à partir des données de la surface des logements récoltées lors du recensement fédéral de la population de 2000. (Source : OFS) . . .	100
33	Poids obtenus à partir des données de la population résidente récoltées lors du recensement fédéral de la population de 2000. (Source : OFS)	101
34	Evolution de 1990 jusqu'en 2050 des HDD calculés sur une base annuelle avec $\theta_{th} = 10^{\circ}\text{C}$	101
35	Evolution de 1990 jusqu'en 2050 des CDD calculés sur une base annuelle avec $\theta_{bp} = 18.3^{\circ}\text{C}$	102
36	Perte estimée dans la production d'électricité nucléaire liée à une hausse des températures.	113
37	Poids utilisés pour le segment “winter overnight tourism”.	119
38	Poids utilisés pour le segment “one-day winter tourism”.	119
39	Distribution des recettes de transport du secteur autrichien des remontées mécaniques durant les mois de la saison d'hiver. (Source : [49])	120
40	Variations par rapport à la période 1961–1990 de la variable “Fractional Snow Cover” pour le segment touristique “winter overnight tourism”. . . .	121
41	Variations par rapport à la période 1961–1990 de la variable “Fractional Snow Cover” pour le segment touristique “one-day winter tourism”.	121
42	Variations par rapport à la période 1961–1990 de la variable “Fractional Snow Cover” pour le secteur de sports d'hiver de la région EUR.	122

43	Baisse en pourcent de la production du segment “winter overnight tourism” par rapport à la baseline (les cylindres rouges représentent des hausses de production).	129
44	Baisse en pourcent de la production du segment “one-day winter tourism” par rapport à la baseline.	130
45	Estimation de l’impact des changements climatiques sur le rendement de l’orge en Suisse à l’horizon 2090 par rapport à la période de référence 1961–1990 (effets via une modification des températures et des précipitations). .	147
46	Estimation de l’impact des changements climatiques sur le rendement du maïs grain en Suisse à l’horizon 2090 par rapport à la période de référence 1961–1990 (effets via une modification des températures et des précipitations).147	
47	Estimation de l’impact des changements climatiques sur le rendement du blé en Suisse à l’horizon 2090 par rapport à la période de référence 1961–1990 (effets via une modification des températures et des précipitations). .	148
48	Part de la population suisse attribuée à 64 stations de MétéoSuisse.	150

Résumé

Principaux enseignements

Le travail accompli dans ce projet fournit une nouvelle contribution dans le domaine encore récent de l'utilisation des modèles d'équilibre général calculable (modèles CGE) afin d'estimer les coûts des changements climatiques jusqu'en 2050. L'accent mis sur l'adaptation constitue un élément central de notre approche et apporte une valeur ajoutée importante par rapport aux études existantes. Dans la terminologie que nous utilisons, l'adaptation peut être soit "endogène", si elle est le fait des acteurs privés (provenant par exemple d'une modification du système des prix), soit "exogène" si elle a pour origine les pouvoirs publics. L'adaptation endogène ou autonome des acteurs économiques peut prendre de très nombreuses formes. Ainsi, un secteur productif peut réagir de différentes manières aux impacts des changements climatiques, en adaptant par exemple son niveau de production et/ou en modifiant ses processus de production. De la même manière, les ménages ont la possibilité de modifier la taille et/ou la composition de leur panier de consommation. Pour la Suisse, nos résultats montrent que l'adaptation endogène des acteurs ne permet pas, en général, d'atténuer l'ensemble du choc initial des changements climatiques, c'est-à-dire qu'il reste un coût en terme de bien-être. Ces cas montrent que les politiques publiques visant à freiner les changements climatiques et à soutenir l'adaptation via des mesures d'adaptation exogènes restent nécessaires. Cet argument aurait encore été plus fort si nous avions estimé les impacts après 2050 avec des changements climatiques plus importants. Dans les différents domaines que nous avons étudiés, nos résultats montrent en effet que les impacts peuvent parfois même plus que doubler entre 2050 et 2100. Une autre raison pour ne pas se reposer uniquement sur l'adaptation endogène est liée aux très grandes incertitudes entourant la situation dans le future, tant en ce qui concerne les impacts des changements climatiques que la capacité réelle d'adaptation des acteurs économiques.

Description du modèle GEMINI-E3

Nos estimations des effets économiques des changements climatiques pour la Suisse sont obtenues à partir d'un modèle CGE de l'économie mondiale, le modèle GEMINI-E3. La force des modèles CGE provient du fait qu'ils intègrent dans leur fonctionnement les innombrables interactions entre les secteurs productifs, les pouvoirs publics et les consommateurs. Ayant déjà été utilisé dans le cadre de l'évaluation de politiques climatiques et énergétiques suisses, le modèle GEMINI-E3 présente l'avantage supplémentaire de disposer d'une représentation détaillée de l'économie suisse. Comme il inclut différentes régions du monde, le modèle GEMINI-E3 permet, de surcroît, de tenir compte des effets des changements climatiques via le commerce extérieur et les termes de l'échange. Afin de pouvoir l'utiliser dans le projet, nous avons dû le modifier de deux manières. D'une part, nous avons modifié la représentation sectorielle de l'économie, soit en y intégrant de nouveaux secteurs (distribution d'eau, tourisme), soit en détaillant des secteurs qui étaient déjà présents dans la version standard du modèle (agriculture). Enfin, deux facteurs de production supplémentaires, la neige naturelle et l'eau brute, ont été intégrés au modèle. Le premier est spécifique au secteur du tourisme alors que le second entre

dans la fonction de production de nombreux secteurs productifs. Grâce à l'introduction de ces ressources et au fonctionnement du modèle (par ex. substitution des ressources, qui sont devenues plus chères parce que plus rares du fait des changements climatiques, par d'autres inputs dans les fonctions de production et de consommation), l'approche que nous avons employée permet de prendre en compte une part importante de l'adaptation des acteurs privés dans nos analyses.

Avec GEMINI-E3, nous mesurons les impacts des changements climatiques pour les secteurs d'activités par la variation de la production ou du chiffre d'affaires et pour la société dans son ensemble par une mesure monétaire de la variation de leur bien-être. Cette mesure globale des impacts diffère quelque peu de la variation du PIB puisque cette dernière notion se rapporte à la production plutôt qu'au bien-être des consommateurs.

Résultats

Ce rapport analyse plusieurs impacts des changements climatiques et leurs conséquences pour l'économie et la société suisses à l'horizon 2050. Du point de vue des ménages, l'effet positif lié à la baisse des besoins de chauffage domine largement les autres effets (+1404 mio CHF). Cet effet positif sur l'économie suisse s'explique principalement par la réduction importante des importations d'agents énergétiques fossiles pour le chauffage. D'une part, les ménages en profitent pour augmenter leur niveau de consommation. D'autre part, les coûts de production de l'industrie et des services baissent, ce dont profitent également les ménages à travers une baisse des prix. Cet effet dépasse largement celui de la hausse des besoins de climatisation dont le coût estimé pour les ménages est de 178 mio CHF. Etant donné que nous nous sommes basés sur des hypothèses conservatrices concernant la pénétration des équipements de climatisation dans le secteur résidentiel, ce chiffre est plutôt à interpréter comme une borne inférieure. La baisse de la demande nette d'énergie des ménages pour le chauffage et la climatisation s'accompagnera d'une baisse des émissions de CO₂. Quant à l'impact des changements climatiques sur la production d'électricité, il sera faible en 2050, provenant, d'une part, d'une baisse d'efficacité des centrales thermiques et, d'autre part, d'une perte de production hydraulique. Pour les ménages, ces effets se traduiront par des coûts en termes de bien-être égaux à respectivement 165 et 99 mio CHF.

De la même manière, la plupart des autres impacts n'ont qu'un effet limité sur l'économie suisse, même plus faible qu'évalué dans des études antérieures. C'est ce qu'on obtient quand on laisse les acteurs économiques et les marchés s'adapter parfaitement aux nouvelles conditions, en utilisant toutes les technologies disponibles aujourd'hui et rentables dans leur mise en œuvre. Par exemple, le coût économique de la raréfaction de la ressource en eau (c'est-à-dire la perte de bien-être pour la société) est estimé à seulement 14 mio CHF dans un scénario climatique moyen. Lorsqu'on y ajoute, pour les secteurs agricoles, l'impact de la hausse des températures sur les rendements de trois cultures (le blé, le maïs grain et l'orge), le coût global est à peine plus marqué puisqu'il atteint 15.2 mio CHF.

Enfin, nous dépeignons un tableau contrasté concernant les effets de la dégradation des conditions d'enneigement sur les stations de ski. Alors que l'activité des stations de basse et moyenne altitude devrait reculer suite aux changements climatiques, celle des stations de haute altitude devrait se maintenir et leur chiffre d'affaires augmenter à cause d'un redéploiement des flux touristiques nationaux et internationaux qui se ferait à leur avantage. Au niveau agrégé, les ménages suisses bénéficieraient de ces effets avec un gain estimé de 83 mio CHF. En revanche, ce gain ne tient pas compte des coûts environnementaux engendrés par la hausse de la production de neige artificielle nécessaire au maintien de l'offre de tourisme d'hiver en Suisse.

Les bénéfices de l'adaptation endogène sont calculés comme la différence entre les coûts directs du "choc" climatique et la perte de bien-être effective après que tous les acteurs économiques aient adapté leur production et leur consommation à la nouvelle situation. Ci-dessous, nous présentons un exemple d'un tel calcul. Pour l'énergie, nous présentons les résultats de scénarios où la hausse des besoins d'énergie pour la climatisation est d'abord simulée pour l'ensemble de l'économie puis séparément pour les secteurs résidentiel et tertiaire.

Tab. 1 résumé: bénéfices de l'adaptation endogène calculés dans le cas de la hausse, induite par les changements climatiques, des besoins d'énergie pour la climatisation.

	Total	Résidentiel	Tertiaire
Coûts directs (mio CHF ₂₀₁₀)	248	97	151
Perte de bien-être (mio CHF ₂₀₁₀)	178	84	94
Bénéfices adaptation (mio CHF ₂₀₁₀)	70	13	57

Note: valeurs obtenues pour des changements climatiques moyens en 2050

Dans le cas précis de la climatisation, les bénéfices de l'adaptation endogène se chiffrent à 70 mio CHF pour l'économie et la société suisses. Ils sont issus de la réduction de l'impact sur le secteur tertiaire à hauteur de 57 mio CHF et de la réduction de l'impact sur le secteur résidentiel à hauteur de 13 mio CHF. Cette répartition s'explique par le fait que les ménages sont directement affectés par la hausse des besoins d'énergie dans le scénario "Résidentiel" alors qu'ils ne le sont qu'indirectement dans le scénario "Tertiaire". En d'autres termes, les bénéfices de l'adaptation sont plus importants dans le scénario "Tertiaire" parce que les possibilités d'atténuer le choc initial à travers l'adaptation endogène y sont plus nombreuses.

Souvent, les changements climatiques rendent moins disponible une ressource naturelle utilisée dans l'économie, comme la neige pour le tourisme ou l'eau météorique pour l'agriculture. Dans ces cas, les coûts d'adaptation peuvent être mesurés comme la hausse du coût moyen de production qui en résulte multipliée par le nouveau niveau de production. Ce coût moyen augmente parce qu'il faut remplacer la ressource naturelle, soit justement une mesure d'adaptation. Le tableau ci-dessous présente les coûts d'adaptation calculés

pour le secteur du tourisme d'hiver et établit également la part de ceux-ci attribuable à l'augmentation de la production de neige artificielle par rapport au scénario de référence.

Tab. 2 résumé: coûts d'adaptation aux changements climatiques pour les stations de ski.

	Stations de ski de basse et moyenne altitude	Stations de ski de haute altitude
Coûts d'adaptation (mio CHF ₂₀₁₀)	7,9	56,8
dont coûts neige artificielle [†] (mio CHF ₂₀₁₀)	4	39

Note: valeurs obtenues pour des changements climatiques moyens en 2050

[†] *coûts supplémentaires, par rapport à la baseline, de la production de neige artificielle*

Bien que les stations de ski de haute altitude seront moins affectées par les changements climatiques que les stations de ski de basse et moyenne altitude, leurs coûts d'adaptation seront supérieurs simplement parce qu'elles constituent un segment touristique dont la taille, d'un point de vue économique, est beaucoup plus grande. Pour les stations de basse et moyenne altitude, l'augmentation de la production de neige artificielle, par rapport au scénario de référence en 2050, coûte 4 mio CHF. Ces dépenses additionnelles pour la neige artificielle atteignent 39 mio CHF pour les stations de ski de haute altitude. Les coûts environnementaux de la neige artificielle ne sont pas estimés et donc n'entrent pas en ligne de compte dans la détermination des coûts d'adaptation.

Au niveau de l'adaptation exogène, la prise en compte de subventions ciblées dans nos simulations a des effets contrastés selon les situations. Comme elle influence les prix, la subvention a un effet de distorsion sur les choix des acteurs économiques et engendre également un coût lié à son financement. En effet, il est supposé que les subventions sont financées par une augmentation de l'impôt sur le revenu. Dans le tourisme, la subvention à l'enneigement artificiel permet au tourisme d'hiver de maintenir un niveau élevé d'activité mais s'accompagne, au niveau agrégé, d'une baisse du bien-être des ménages de 10 mio CHF¹. C'est aussi le cas lorsqu'on applique une subvention au prix de l'eau potable pour les ménages lors d'un impact important des changements climatiques sur la ressource en eau brute. La subvention est ajustée de telle manière à ce que le prix de l'eau potable reste inchangé pour les ménages malgré la raréfaction de la ressource en eau. Néanmoins, leur bien-être diminue de 2.9 mio CHF du fait qu'une partie de leurs revenus doit leur être retranchée afin de financer la subvention. Cette subvention a aussi pour conséquence de diminuer la ressource en eau à disposition des autres secteurs ce qui en augmente le prix sans subvention. Par conséquent, les prix des biens et services produits en Suisse deviennent plus chers, ce qui influence aussi négativement le bien-être. Finalement, nous avons aussi analysé les effets d'une subvention sur l'irrigation. Pour les secteurs agricoles ayant recours à l'irrigation, la subvention atténue très légèrement les pertes de production, mais freine aussi l'augmentation des prix des produits par rapport

1. La subvention rend la neige artificielle meilleur marché ce qui a pour conséquence que les secteurs de sports d'hiver en produisent plus. Les coûts environnementaux associés ne sont pas pris en compte dans nos analyses ce qui signifie que le coût de bien-être de 10 mio CHF est sous-évalué.

au scénario équivalent sans subvention. Globalement, la subvention sur l'irrigation a un impact positif de 0.7 mio CHF sur le bien-être des ménages.

Le tableau suivant résume nos principaux résultats à l'horizon 2050 pour un scénario climatique moyen et les compare avec ceux obtenus dans l'étude d'Ecoplan/Sigmaplan de 2007 [31] lorsque cela est possible.

Tab. 3 résumé: tableau synoptique des résultats pour deux scénarios, l'un avec et l'autre sans mesure d'adaptation exogène, et comparaison de ces résultats pour 2050 avec ceux de l'étude d'Ecoplan/Sigmaplan sur l'impact des changements climatiques en Suisse.

		Scénario sans subvention		Scénario avec subvention*		Etude Ecoplan
		Coûts de bien-être (1)	Bénéfices adapt. endogène (2)	Coûts de bien-être (3)	Coûts de la subvention† (4)	Coûts‡ (5)
Eau		14	—	14	0	—
Agriculture		15,2	—	14,5	−0,7	—
Demande d'énergie	Chauffage	−1 404	—	—	—	−700
	Climatisation	178	70	—	—	1 050
Production d'électricité	Centrales thermiques	165	—	—	—	—
	Hydraulique	99	—	—	—	400
Tourisme	Tourisme d'hiver	−83	137†	−73	10	120

Note: valeurs obtenues en mio CHF de 2010 pour des changements climatiques moyens en 2050 ;

— : valeur non disponible car non calculée ou pas pertinente

** Respectivement subvention sur le prix de l'eau potable pour les ménages (Eau), sur l'irrigation (Agriculture) et sur les coûts de la neige artificielle (Tourisme)*

† Les valeurs de cette colonne s'obtiennent en soustrayant les valeurs de la colonne 1 des valeurs de la colonne 3

‡ Coûts d'équilibre général calculés seulement pour le tourisme d'hiver. Valeurs données en mio CHF sans indication a priori de l'année

† Inclut les bénéfices pour l'économie suisse de l'adapt. endogène des résidents suisses et étrangers

Limitations et questions ouvertes

Pour une économie ouverte comme l'est celle de la Suisse, il semble a priori délicat d'évaluer les conséquences des changements climatiques sans prise en compte de leurs impacts dans les autres régions du monde. Pour le secteur du tourisme d'hiver, nos résultats ont effectivement montré que la prise en compte de ces impacts à l'étranger modifiait fondamentalement l'évaluation des effets économiques des changements climatiques pour la Suisse. L'exemple du tourisme d'hiver parle clairement en faveur d'étendre ce genre d'analyse à d'autres secteurs comme l'agriculture. L'autre aspect mis en lumière par notre analyse sur le tourisme d'hiver est la disparité des impacts en fonction de la situation géographique des stations de ski. Cela montre que certaines régions peuvent être beaucoup plus affectées que d'autre par les changements climatiques. Toutefois, le fait que nous ayons travaillé à un niveau agrégé n'a en général pas permis d'analyser ces disparités régionales. Il ne faut donc pas oublier que certains des effets modérés que nous avons mesurés au niveau global peuvent cacher des effets beaucoup plus marqués

au niveau régional.

Il est aussi important de souligner l'incertitude entourant la réelle capacité d'adaptation des acteurs économiques dont dépend le potentiel de réduction des coûts des changements climatiques. Cette capacité est peut-être surévaluée dans nos analyses. Cela provient notamment du fait qu'il n'y a pas de frictions dans le modèle GEMINI-E3. Par exemple, un facteur de production, tel que le travail, est parfaitement mobile entre secteurs suite à un choc. Ainsi, le modèle fonctionne tellement bien qu'il y a un risque de sous-évaluer les conséquences des impacts des changements climatiques.

Enfin, notre analyse n'a pas englobé tous les aspects des changements climatiques, loin s'en faut. Elle n'est pas exhaustive tant en ce qui concerne les secteurs touchés (par ex. la santé) que les impacts (par ex. les événements météorologiques extrêmes, les impacts sur les biens et services non-marchands comme la biodiversité et les écosystèmes). Ceci explique pourquoi nous renonçons, sur la base des résultats obtenus dans ce projet, à nous prononcer sur l'effet net des changements climatiques pour l'économie suisse.

Remerciements

Nous remercions Beat Goldstein pour son travail sur le secteur de l'énergie de même que Cecilia Matasci, Reto Engler et Florent Baume pour leur aide concernant la collecte et le traitement des données nécessaires au projet. Nous tenons également à remercier Shardul Agrawala (OCDE) et Bruno Abegg (Hochschule für Technik und Wirtschaft Chur) pour nous avoir fourni des données sur l'offre touristique des pays alpins ainsi que Massimiliano Zappa (WSL) pour nous avoir mis à disposition les données sur l'évolution des ressources en eau. De plus, ce rapport aura bénéficié des nombreux échanges que nous avons eus avec Pamela Köllner-Heck, Cecilia Matasci, Philippe Thalmann et l'ensemble du groupe d'accompagnement. Nous sommes aussi redevables aux personnes que nous avons été amenés à contacter pour la réalisation de ce travail et dont on trouvera en annexe [A](#) les noms et affiliations. Nous remercions en outre les participants du NCCR climate WP 4 Workshop à Berne. Les données des scénarios CH2011 sont fournies par le *Center for Climate Systems Modeling* (C2SM) de l'ETHZ. Nous exprimons aussi notre reconnaissance pour les données du projet européen ENSEMBLES que nous avons utilisées dans notre travail. Ce projet a été financé par le *EU FP6 Integrated Project ENSEMBLES (Contract number 505539)*. Il va sans dire que nous sommes seuls responsables des insuffisances et erreurs qui subsisteraient dans ce rapport.

1 Introduction

Après s'être longtemps cantonnées à la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES), les discussions sur les changements climatiques intègrent de plus en plus, en Suisse comme à l'étranger, la nécessité de s'adapter aux impacts futurs et celle de planifier cette adaptation. En effet, il ne fait pratiquement plus aucun doute que les sociétés humaines devront faire

face à un certain degré de changements climatiques durant le XXI^e siècle quelques soient les efforts internationaux consentis pour réduire les émissions de GES. Le présent projet s'inscrit parfaitement dans cette tendance puisqu'il vise à évaluer les coûts futurs des changements climatiques pour la Suisse ainsi qu'à déterminer le rôle que seront amenés à jouer les mesures d'adaptation afin d'en réduire l'ampleur.

Pour ce faire, le modèle GEMINI-E3 est employé. Il s'agit d'un modèle d'équilibre général calculable (modèle CGE) multi-régional² qui est hébergé au sein du groupe de Recherche en Économie et Management de l'Environnement (REME) de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). Jusqu'à présent, il a surtout été utilisé et développé afin d'analyser les coûts économiques de différentes politiques énergétiques et climatiques³. C'est la raison pour laquelle il a été nécessaire de l'amender dans le but de pouvoir répondre aux objectifs de la présente recherche. Dans un premier temps, un travail conséquent a été effectué au niveau de la représentation de l'économie afin d'intégrer ou de détailler les secteurs les plus concernés par les changements climatiques. L'étude de la littérature existante sur les impacts, rendue plus aisée par le développement d'une base de données sur les impacts des changements climatiques en Suisse⁴, nous a permis de les identifier. Il s'agit des secteurs du tourisme, de l'agriculture, de l'eau, de la santé, de l'assurance, de l'énergie et des infrastructures. Ces secteurs ont donc été détaillés ou intégrés dans le modèle avec pour conséquence que le nombre total de secteurs qui y sont représentés est passé de 18 à 28⁵. D'autre part, les ressources naturelles que sont l'eau, la neige et la terre ont été introduites dans le modèle comme facteurs de production afin de permettre la prise en compte d'un certain nombre d'impacts liés aux changements climatiques. En parallèle à ce travail sur les secteurs productifs, nous avons également modifié la structure de consommation des ménages. Cette modification, loin d'être purement technique, est très importante et constitue l'un des points forts de l'utilisation d'un modèle CGE. Elle permet de prendre en compte les nombreux impacts des changements climatiques sur la demande et la manière dont les consommateurs s'adapteront à ceux-ci. Un effort important de documentation a aussi été entrepris dans le but de déterminer les options d'adaptation qui sont et/ou seront à la disposition des producteurs et consommateurs suisses. Un soin particulier a été donné à identifier les mesures susceptibles d'être promulguées, financées ou subventionnées par les pouvoirs publics. Tout au long du rapport, nous ferons en effet la distinction entre mesures *endogènes* et mesures *exogènes*, les premières étant le fait des acteurs privés au contraire des secondes qui sont le fait des pouvoirs publics⁶. L'adaptation du secteur privé est typiquement déclenchée par un changement de prix et entraîne le plus souvent un changement dans les choix de consommation ou dans les processus de production selon que cela soit aux consom-

2. Au sens de différentes régions du monde. La Suisse est l'une de ces régions.

3. De nombreuses informations et publications sont accessibles sur le site dédié à ce modèle <http://gemini-e3.epfl.ch>

4. Développée au REME, la base de données SWIDCHI est accessible à l'adresse internet suivante: <http://swidchi.epfl.ch>

5. La nouvelle nomenclature est présentée à l'annexe B. Pour l'heure, les 28 secteurs ne sont détaillés dans leur intégralité que pour la Suisse. En revanche, un secteur touristique a été intégré et détaillé dans chacune des six régions du modèle. Par ailleurs, l'année de référence du modèle est 2001. Il faut noter que la nouvelle table Input-Output sur la Suisse pour l'année 2005 ([24]) n'a pas pu être utilisée compte tenu des délais quant à sa disponibilité.

6. La manière de désigner les mesures d'adaptation du secteur public respectivement du secteur privé n'est pas universelle. En anglais, les termes "*endogenous*", "*autonomous*", "*private*", "*market driven*", "*automatic*" et "*spontaneous*" sont plus ou moins équivalents pour désigner l'adaptation du secteur privé. Pour l'adaptation dont l'impulsion est fournie par les pouvoirs publics, les termes anglais les plus usités sont les suivants : "*planned*", "*policy driven*" et "*public*".

mateurs ou aux producteurs de s'adapter. Quant à l'adaptation du secteur public, elle peut consister en l'approvisionnement d'un bien public (infrastructures, R&D, ressources naturelles), en la fixation de nouvelles normes et réglementations ou encore en la modification de la fiscalité.

En parallèle à ce travail foncier sur le modèle, nous avons dû entreprendre un certain nombre d'études sectorielles visant à déterminer la sensibilité d'un secteur à une ou plusieurs variables climatiques. Cette analyse de la sensibilité s'est généralement fondée sur des estimations économétriques qui étaient soit préexistantes soit qui ont été obtenues à l'aide de recherches originales. Quoique ces recherches fassent partie intégrante du projet, elles ne sont relatées dans ce rapport que sous une forme condensée⁷. Des études sectorielles ont été menées dans les domaines du tourisme, de la consommation et de la production d'énergie, de l'agriculture et de l'eau.

Ayant estimé la sensibilité de différents secteurs aux conditions climatiques, il nous a fallu déterminer la manière dont ces dernières allaient être modifiées par les changements climatiques au cours du XXI^e siècle. Au niveau régional, la manière dont varieront dans le futur le climat et les variables climatiques qui le décrivent nous est fournie par les simulations du projet européen ENSEMBLES. Outre le fait d'être régionalisées à l'échelle 25 x 25 km, ces simulations présentent l'avantage de couvrir l'Europe ce qui nous a permis, dans le cas du tourisme d'hiver, de simuler les impacts des changements climatiques sur les conditions d'enneigement de cinq pays de l'arc alpin. En revanche, ces simulations ne découlent, à une exception près, que du scénario d'émission A1B ce qui restreint les possibilités d'analyser les impacts potentiels des changements climatiques sur l'économie suisse. Ce désavantage associé aux simulations d'ENSEMBLES peut être en partie gommé en utilisant les nouveaux scénarios du changements climatique en Suisse (CH2011, cf. [26]) qui ont été mis récemment à la disposition du public. Certains de ces scénarios ont été utilisés afin de recalculer les effets des changements climatiques sur la demande future d'énergie pour le chauffage et la climatisation ainsi que sur la production future des centrales thermiques.

Le présent document est structuré de la manière suivante. Les sections 2, 3, 4 et 5 résument les résultats de nos recherches bibliographiques sur les impacts et l'adaptation en même temps qu'elles décrivent nos choix de modélisation pour les secteurs de l'eau, de l'agriculture, de l'énergie et du tourisme. La section 6 présente les autres modifications apportées au modèle, à savoir le nouveau découpage géographique en six régions et la structure de la nouvelle fonction de consommation. La description de la façon dont nous avons obtenu des impacts régionalisés des changements climatiques à l'aide des données du projet ENSEMBLES est fournie à la section 7. Les hypothèses que nous avons adoptées afin de contruire le scénario sans changements climatiques (i.e. le compte de référence ou dans la terminologie anglo-saxonne la baseline) sont présentées dans la section 8. Ces hypothèses sont généralement différentes de celles prises dans les études sur les impacts directs et indirects des changements climatiques dont les résultats sont présentés aux sections 2 à 5. La prise en compte des impacts des changements climatiques dans les secteurs de l'eau, de l'agriculture, de l'énergie et du tourisme implique des déviations par rapport à cette baseline que nous présentons à la section 9. En effet, cette section fournit les résultats de nos simulations concernant les conséquences économiques de certains impacts ciblés des changements climatiques. Enfin, la section 10 offre une série de conclusions par rapport aux résultats qui ont été obtenus.

7. Il est prévu de valoriser une partie de ces recherches en les faisant publier dans des journaux scientifiques.

2 Le secteur de l'eau

2.1 Captage et consommation d'eau en Suisse

En 2008, les distributeurs d'eau potable ont capté près de 980 millions m³ d'eau [95]. Il s'agit en majorité d'eau souterraine et d'eau de source, qui représentent chacune environ 40% de l'eau captée, alors que l'eau des lacs et des rivières couvre les 20% restants.

La majorité de cette eau (environ 60%) est ensuite livrée aux ménages et aux petits artisans, une partie plus faible revenant à l'artisanat et à l'industrie (près de 20%). Il faut noter que près de 15% de l'eau captée est perdue sur les réseaux des distributeurs.

La consommation d'eau en Suisse ne se limite pas à l'eau potable livrée par les distributeurs d'eau. En effet, l'industrie et l'agriculture captent elles-mêmes une partie importante de l'eau qu'elles utilisent [39]. Ainsi, approximativement 75% de l'eau employée dans l'industrie suisse était captée directement en 2006, ceci sans tenir compte de l'eau de refroidissement des centrales nucléaires, qui nécessitent près de 1650 millions de m³ d'eau de rivières par année. La consommation d'eau totale de l'industrie sans l'eau de refroidissement des centrales se monte à plus de 1100 millions de m³. Parmi les différents secteurs industriels, la chimie ressort comme le plus grand consommateur d'eau, suivi par le traitement des déchets et des eaux usées, les secteurs alimentaires et métallurgiques.

L'agriculture capte également elle-même la grande majorité de l'eau qu'elle utilise, soit un total de 411 millions de m³, particulièrement pour l'irrigation des cultures. Plus précisément, 35% de l'eau provient de lacs et rivières, alors que 60% émane de sources et 3% est de l'eau souterraine. Finalement, l'eau de pluie constitue 2% du captage. La part élevée de l'eau de source s'explique par le fait que l'eau qui s'écoule dans les puits est comptée comme consommation agricole. Dans ce projet, cette part n'est en revanche pas attribuée à l'agriculture lors du calcul des consommations d'eau brute par les secteurs.

2.2 Changements climatiques et les ressources en eau

Le changement climatique va affecter la Suisse. D'ici 2050, le GIEC envisage un réchauffement de la température de 2°C en hiver et de 2.5°C en été. Les estimations prévoient de plus une augmentation des précipitations de 8% durant l'hiver mais une diminution de 15% en été (cf. [74] et [79]). Selon un rapport de l'OcCC, la superficie des glaciers diminuera de 50 à 90% d'ici 2050 selon les scénarios et la limite de neige augmentera d'environ 360 mètres [75]. Ces changements auront des répercussions sur les ressources d'eau en Suisse, qui diffèrent souvent selon les bassins versants. L'évolution future des précipitations détermine en grande partie le débit des cours d'eau qui dépendent surtout de la pluie. L'impact sur le débit des cours d'eau alimentés essentiellement par la fonte des neiges et les glaciers est également difficile à prédire, il va probablement commencer par augmenter puis diminuer d'ici 2050 lorsqu'une partie des glaciers aura disparu. Globalement, l'évolution future des débits est incertaine. Alors que les études du laboratoire ECHO sur 11 bassins alpins prédisent par exemple une diminution des débits de 5 à 15% selon les bassins sur la période 2020 à 2049 ([54], [55]), le projet CCHydro [104] propose des prévisions plus différenciées. Ces dernières sont basées sur de récents scénarios climatiques et prévoient une évolution des débits qui varie entre -6.9 et +8.6% en 2050. Cette incertitude relève en partie de la difficulté de prédire l'évolution des précipitations au niveau annuel. Les différents scénarios simulés dans le cadre du projet CCHydro prévoient en revanche tous une

diminution des débits en été et une augmentation en hiver (cf section 9.1.1). La diminution des précipitations ainsi que l’augmentation de l’évapotranspiration et la baisse du niveau des cours d’eau devraient également provoquer une diminution de la reconstitution des réserves d’eau et une baisse du niveau des nappes phréatiques en été. On pourra vraisemblablement aussi voir diminuer le débit des sources, surtout si elles sont alimentées par un bassin de faible étendue [43]. Différentes études visant à quantifier les impacts des changements climatiques sur les eaux souterraines en Suisse sont actuellement en cours (notamment deux projets du PNR 61). De plus, la température de l’eau se modifie. D’ici 2050, les cours d’eau vont se réchauffer d’environ 2°C par rapport à 1990 [81]. Ceci aura un impact sur la teneur en oxygène des lacs et donc sur la croissance d’algues et la qualité de l’eau. La température des eaux souterraines va probablement aussi augmenter [43].

Une diminution des ressources en eau disponibles durant l’été accompagnée d’une augmentation de la demande peut créer des situations de concurrence pour l’usage de la ressource. Par exemple, les besoins d’irrigation des cultures vont augmenter. Fuhrer [41] estime par exemple que les besoins en irrigation de l’agriculture pourraient se multiplier par 4 d’ici 2100. La demande d’eau des ménages devrait également augmenter, essentiellement pour des usages récréatifs et l’arrosage des jardins. De plus, le réchauffement climatique provoque une augmentation de la demande d’électricité en été à cause de l’usage accru de climatisation (cf. section 4.3.1). Simultanément, les faibles débits des cours d’eau risquent d’amputer les capacités de production d’énergie hydraulique. A cela s’ajoutent le bas niveau des cours d’eau ainsi que leur réchauffement. Ces phénomènes posent également un problème à l’industrie et particulièrement aux centrales thermiques qui ont besoin d’eau de refroidissement. En effet, la protection des écosystèmes commande l’imposition de seuils maximaux de températures des cours d’eau. Lors d’étés très chauds comme celui de 2003, les températures trop élevées de l’eau peuvent imposer une réduction de la production des centrales (cf. section 4.2.2).

2.3 Impacts sur le secteur de l’eau et mesures d’adaptation

La réduction de la quantité disponible des ressources d’eau en été, ainsi que l’augmentation de la demande de cette ressource pour des usages concurrents représentent les défis que la distribution d’eau en Suisse doit surmonter.

L’impact économique du changement climatique sur la distribution d’eau en Suisse est estimé dans une étude de Meier [71]. L’auteur suppose qu’afin de conserver la grande qualité et sécurité d’approvisionnement de la distribution d’eau, des investissements supplémentaires dans une augmentation de la capacité des réservoirs ainsi qu’une interconnexion des distributeurs sont nécessaires. Cette dernière se traduit par le besoin supplémentaire d’infrastructures et l’expansion du réseau de distribution d’eau en Suisse. L’étude estime que ces mesures d’adaptation augmentent la valeur de remplacement de l’infrastructure de la distribution d’eau en Suisse de 30%. En se basant sur une estimation de la valeur de remplacement de l’infrastructure de distribution d’eau à Zürich, ces mesures requièrent des investissements supplémentaires de 200 millions de CHF par an.

Parmi les réponses au changement climatique les plus souvent préconisées pour le secteur de la distribution d’eau se trouve l’interconnexion des distributeurs [43]. Cette mesure permet de multiplier et diversifier les sources et types d’eau à disposition des distributeurs pour subvenir aux besoins de leur clientèle. En effet, l’été 2003 a montré que les étés particulièrement chauds et secs posent actuellement essentiellement des problèmes aux petits distributeurs qui ne disposent que d’un nombre très limité de ressources d’eau. Certains d’entre eux n’ont pu entièrement

subvenir à la demande d'eau potable durant cette période [23]. Une autre solution consiste à augmenter la capacité des réservoirs, tel que le suggère Meier [71]. Tant l'interconnexion des distributeurs que l'expansion des réservoirs demande des investissements supplémentaires dans le capital des distributeurs d'eau et se traduit par une augmentation de la quantité de capital nécessaire pour assurer le service de distribution d'eau.

Un recul de la quantité de ressources en eau disponibles appelle également à la diminution des pertes sur le réseau de distribution. Ces dernières se montaient à près de 15% de l'eau captée en 2008. Cette mesure se traduit également par des investissements de capital supplémentaires, cette fois sous forme de remise en état ou de renouvellement de parties du réseau de distribution. Notons par ailleurs que le problème des pertes d'eau est encore bien plus important dans l'agriculture, où l'adoption de méthodes d'irrigation plus efficaces présente une mesure d'adaptation au changement climatique intéressante. Le subventionnement d'investissements dans les réseaux de distribution d'eau représente une mesure d'adaptation exogène possible dans ce cadre.

Le changement climatique va aussi se traduire par une augmentation de la température de l'eau. Un traitement supplémentaire de l'eau constitue une mesure d'adaptation permettant de maintenir la très haute qualité de l'eau potable. L'analyse de l'impact économique d'une augmentation de la température d'eau se limite dans cette étude à l'impact sur la production d'énergie, les conséquences sur la qualité de l'eau et les éventuelles mesures d'adaptation s'y rapportant ne sont pas examinées. En effet cette étude se concentre sur les impacts de variations de la quantité d'eau disponible, et non les modifications de qualité.

Les mesures présentées auparavant visent en grande partie à améliorer les capacités des distributeurs d'eau à livrer une quantité d'eau qui suffise à répondre à toute la demande. Mais la consommation d'eau va aussi devoir s'adapter à la raréfaction de l'eau, en particulier en été. Un usage plus économe de l'eau potable, par exemple à travers l'utilisation d'appareils ménagers plus efficaces (machines à laver, etc.) ou encore de processus de production moins intensifs en eau, peut être envisagé par les consommateurs, qu'ils soient industriels ou privés.

De même, des incitations à un emploi plus économe de la ressource à travers les prix de cette dernière représentent une réponse possible [75]. Les prix peuvent aussi être utilisés pour répondre aux nouvelles situations de concurrence entre les différents usages pour la ressource d'eau. En effet des mesures de subventions ou de taxation de l'eau différenciées selon les catégories de consommateurs (industries, ménages, etc) permettent d'établir la priorité de certains usages et de concentrer les incitations aux économies d'eau à travers les prix pour des catégories de consommateurs choisies. Il est également possible de réglementer l'accès à la ressource pour certains usagers, par exemple à travers des concessions. Ces mesures d'adaptation exogènes ne concernent pas seulement le secteur de distribution d'eau potable, mais également le secteur agricole, touristique ainsi que tous les secteurs pour lesquels l'eau constitue un facteur de production.

Le tableau 1 résume des mesures d'adaptation possibles dans le secteur de l'eau. Il indique s'il s'agit de mesures du côté offre ou demande et précise si elles peuvent être qualifiées d'endogène ou d'exogène. Il met également en évidence les mesures d'adaptation intégrées dans cette étude.

Tableau 1 – Mesures d’adaptation envisageables dans le secteur de l’eau.

Adaptation - côté offre	Endogène	Exogène	GEMINI-E3
Compensation de la raréfaction de la ressource par du capital	X		X
-Interconnexion des distributeurs d’eau			
-Augmentation de la capacité des réservoirs			
-Diminution des pertes d’eau sur le réseau			
Subventionnement des investissements		X	
Traitement supplémentaire de l’eau	X		
Adaptation - côté demande			
Processus de production moins intensifs en eau	X		X
Captage direct de l’eau	X		X
Politique de prix/taxation/subventions		X	
-Subvention		X	X
Réglementation d’accès à l’eau pour les différents usagers		X	X

La section suivante décrit plus en détails comment le secteur de l’eau est représenté dans le modèle et de quelle manière les mesures d’adaptation sont intégrées dans l’analyse.

2.4 Représentation du secteur de l’eau potable et de la ressource en eau dans GEMINI-E3

Le changement climatique aura probablement un impact sur les ressources en eau disponibles en Suisse, et donc sur tous les secteurs qui utilisent l’eau comme facteur de production. Afin de pouvoir analyser les conséquences économiques de ces changements, nous avons introduit deux nouveaux éléments dans le modèle. Tout d’abord, nous avons ajouté les ressources d’eau brute dans la matrice de comptabilité sociale pour pouvoir mesurer les conséquences d’une modification de leur disponibilité. Ensuite, afin de pouvoir représenter spécifiquement les impacts du changement climatique sur le secteur de l’eau, nous avons intégré un secteur de captage, traitement et distribution d’eau dans GEMINI-E3 (cf. annexe B et le secteur 28 de la nomenclature).

2.4.1 Les ressources en eau brute dans le modèle

Afin de pouvoir analyser l’impact économique d’une éventuelle diminution de la disponibilité des ressources en eau, le modèle GEMINI-E3 doit explicitement tenir compte de l’eau brute utilisée dans les processus de production des différents secteurs. Ainsi, une ligne représentant l’utilisation d’eau brute est introduite dans la matrice de comptabilité sociale, base de données qui représente toutes les transactions économiques en Suisse. Les dotations initiales de cette ressource d’eau brute sont calculées à partir de deux éléments clés, les volumes d’eau utilisés ainsi que le prix de l’eau.

L’étude sur la consommation d’eau de l’économie suisse [39] ainsi que les résultats statistiques des distributeurs d’eau en Suisse [95] informent sur les quantités d’eau brute utilisées respectivement par les différents secteurs secondaires et tertiaires et les distributeurs d’eau en 2006.

Tout comme dans l'étude [39], nous nous sommes concentrés sur les secteurs qui sont les plus grands utilisateurs d'eau.

Pour les secteurs agricoles, les volumes d'eau utilisés pour l'irrigation proviennent d'une étude réalisée sur le sujet en 2006 [102]. Selon cette étude, l'irrigation se concentre sur les fruits et légumes et sur les prairies. Afin de déterminer la consommation d'eau des secteurs agricoles de cultures, fruits et légumes et autres produits agricoles tels que définis dans la section 3.4.1, nous supposons que ces secteurs n'utilisent de l'eau que pour irriguer leurs cultures. Pour les secteurs de production de lait et d'autres produits animaliers, les volumes d'eau brute utilisée sont calculés à partir d'informations sur la consommation d'eau par unité de bétail, le pourcentage approximatif d'eau extraite directement par les agriculteurs (cf. [39]) de même que le nombre de vaches laitières et la quantité de bétail en unités de gros bétail (UGB) en Suisse (cf. [18] et [73]).

Ainsi la consommation dans le secteur des autres produits animaliers se calcule par exemple comme suit:

Consommation annuelle d'eau brute = UGB hors vaches laitières * consommation journalière par UGB * 365 * part d'eau extraite directement

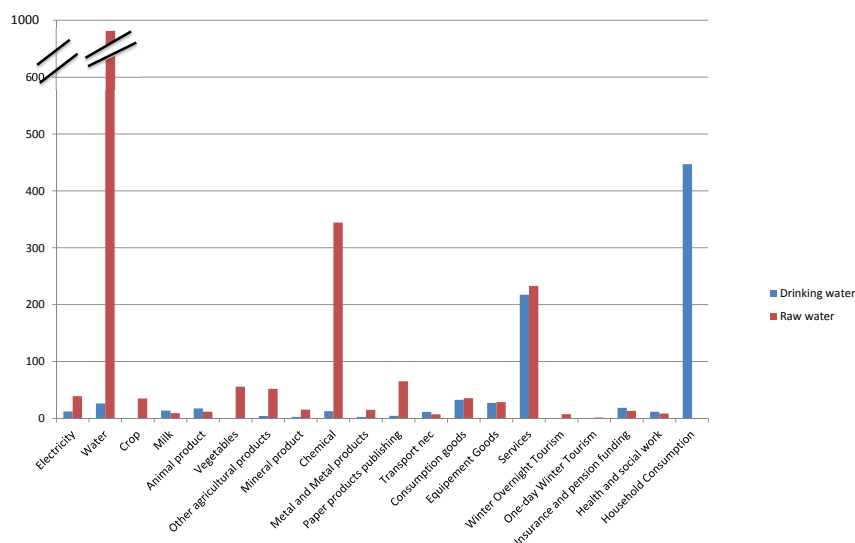


Figure 1 – Consommation d'eau brute et potable en Suisse en 2001 en Mios de m³

Comme le montre la figure 1, le secteur de distribution d'eau potable est le plus grand utilisateur de ressource d'eau brute, suivi par le secteur chimique et les services. L'importante extraction d'eau brute des services provient de l'inclusion dans ce secteur de l'évacuation et du traitement des déchets, dont la consommation d'eau brute est importante. Parmi les secteurs agricoles, les fruits et légumes sont les plus grands utilisateurs d'eau brute.

En plus des volumes d'eau brute employés par secteur, le calcul des dotations initiales requiert la connaissance du prix de la ressource d'eau brute. En Suisse, les frais pour l'extraction d'eau

brute sont définis au niveau cantonal ou municipal et diffèrent beaucoup d’une commune à l’autre [38]. De plus, il manque une base de données centrale qui détaillerait les tarifs de l’eau brute en Suisse. Dans cette étude, nous suivons [38] et empruntons les charges du canton de Zürich de 0.01 CHF₂₀₁₀ par m³ d’eau pour le calcul de la valeur de l’eau brute utilisée.

Pour intégrer les ressources d’eau brute dans la matrice de comptabilité sociale, la valeur de la ressource est soustraite à la dotation en capital. En effet, nous supposons que lorsque la matrice ne contenait pas encore explicitement de ressource brute en eau, la rémunération de ce facteur était incluse dans la dotation de capital.

L’extraction d’eau brute n’utilise pas seulement la ressource en eau, mais emploie également d’autres facteurs de production. Nous supposons que ces facteurs sont du capital (équipement de pompage, etc.) et de l’énergie. Les coûts d’énergie et de capital encourus pour l’extraction d’un mètre cube d’eau sont estimés à partir des structures de dépenses des distributeurs d’eau tels que présentés dans la matrice de comptabilité sociale. Pour le calcul du capital employé pour l’extraction de l’eau, il faut cependant tenir compte du fait que les distributeurs d’eau extraient, distribuent et vendent de l’eau, mais que seules les dépenses liées à l’extraction sont d’intérêt ici. Nous utilisons donc la part des investissements qui revient aux stations (environ 24%, alors que 76% des investissements vont dans les conduites) [95] comme clés de répartition des charges de capital entre l’extraction et la distribution d’eau. Ainsi, les charges d’énergie pour l’extraction d’un mètre cube d’eau se montent à environ 0.03 CHF₂₀₁₀ et le capital utilisé à environ 0.24 CHF₂₀₁₀. Les dépenses totales pour l’extraction d’eau brute sont calculées en multipliant les charges unitaires par le volume d’eau extrait.

Enfin, nous avons séparé la ressource en eau brute en deux blocs distincts, qui sont l’eau brute d’irrigation des cultures et l’eau brute destinée à tous les autres usages. En effet, la section 9.1.1 montre que les impacts des changements climatiques sur les ressources en eau brute diffèrent beaucoup selon la saison. Ainsi les débits vont par exemple augmenter d’octobre à avril mais diminuer de mai à septembre. Il est difficile d’intégrer dans un modèle à base annuelle tel que GEMINI-E3 des évolutions saisonnières. Pour résoudre ce problème, nous avons décidé de considérer séparément l’eau brute d’irrigation, dont l’usage est saisonnier. En effet, nous supposons que les secteurs de production végétale, c’est-à-dire les cultures fourragères (“Crops n.e.c.”), les cultures maraîchères (“Vegetables, fruits and nuts”) et les autres cultures (“Other agricultural products”) utilisent de l’eau surtout au printemps, en été et au début de l’automne. Ainsi notre modèle comporte deux ressources en eau distinctes, l’eau brute d’irrigation et l’eau brute destinée aux autres usages, qui seront impactées différemment par les changements climatiques.

2.4.2 Le secteur de distribution d’eau potable

Le plus grand consommateur de ressource d’eau brute est le secteur de distribution d’eau potable. Comme son nom l’indique, ce secteur capte de l’eau brute et la transforme en un bien distinct: l’eau potable. Cette dernière est ensuite consommée par les ménages et sert d’input à différents secteurs productifs.

Initialement, le secteur de distribution d’eau n’apparaissait pas dans le modèle GEMINI-E3. C’est pourquoi nous avons construit un tel secteur à partir de la base de données GTAP6 pour les consommations de différents inputs par le secteur de distribution d’eau potable. Les données sur les consommations d’eau potables présentées dans l’étude sur la consommation d’eau de l’économie suisse [39] ainsi que les résultats statistiques des distributeurs d’eau en Suisse [95] sont utilisées pour construire les quantités d’eau potable consommées par les différents secteurs ainsi que les ménages. Enfin, nous attribuons un prix de 1.85 CHF₂₀₁₀ par m³ à l’eau potable. Ce prix

correspond au prix moyen de l'eau potable en Suisse en 2001, calculé sur la base de données publiées par la Surveillance des prix (<http://www.preisvergleiche.preisueberwacher.admin.ch> et [39]).

Les plus grands consommateurs d'eau potable sont de loin les ménages, suivis par le secteur des services et ceux des biens de consommation et d'équipement. Le secteur de la production du lait ainsi que celui qui regroupe le reste de la production animale sont les secteurs agricoles qui utilisent le plus d'eau potable, dont ils se servent pour abreuver les animaux.

2.4.3 La structure de production du secteur de distribution d'eau potable et des autres secteurs industriels qui utilisent de l'eau brute

L'arborescence de la figure 2 illustre la structure de production du secteur de l'eau telle qu'elle est modélisée dans GEMINI-E3 à l'aide de fonctions CES⁸. Le secteur utilise du capital, du travail, de l'énergie, des matériaux et finalement de la ressource en eau pour produire puis distribuer de l'eau potable. La ressource en eau est explicitement incluse dans le modèle comme facteur de production, et ce non seulement pour le secteur de distribution d'eau potable, mais aussi dans d'autres secteurs, comme par exemple l'agriculture ou le secteur chimique. Dans la calibration du modèle, il convient de porter une attention particulière aux élasticités de substitution entre les différents facteurs de production, qui représentent les possibilités de remplacer un input par un autre. Dans cette section, nous nous concentrons sur l'élasticité de substitution entre l'eau et les autres facteurs de production, qui illustre la possibilité de remplacer la ressource en eau brute par exemple par du capital dans la production d'eau potable.

Les élasticités sont définies grâce à une revue de la littérature. Les analyses qui contiennent l'eau comme facteur de production accordent généralement une valeur faible à l'élasticité de substitution entre l'eau et d'autres inputs. La première élasticité qu'il convient de définir est σ , l'élasticité de substitution entre la ressource d'eau brute et les autres facteurs de production dans le secteur de distribution d'eau potable. L'intuition commande l'attribution d'une valeur plutôt faible à ce paramètre. On observe en effet que certaines études utilisent même des fonctions de production de type Leontief et assignent donc une valeur de zéro à l'élasticité de substitution entre l'eau et les autres facteurs de production [45]. Nous avons également opté pour une élasticité très faible $\sigma = 0.025$, mais pas nulle, entre l'eau et les autres facteurs. Ce choix laisse au secteur de distribution d'eau la possibilité de s'adapter aux changements climatiques par des investissements en capital par exemple pour réduire les pertes d'eau sur le réseau. Une élasticité de $\sigma = 0.025$ est également assez faible pour s'assurer que ces pertes restent positives. En effet, une valeur plus élevée de cette élasticité facilite trop la substitution de la ressource d'eau brute dans la production d'eau potable et pourrait résulter en des pertes d'eau négatives.

D'autre part, au niveau des ressources employées comme consommations intermédiaires dans les différents secteurs, nous distinguons l'eau potable de l'eau industrielle et de l'eau d'irrigation, l'eau potable étant celle livrée par les distributeurs d'eau, alors que l'eau industrielle ou d'irrigation est captée directement par l'industrie ou l'agriculture. En effet, l'industrie capte elle-même environ 75% de l'eau qu'elle utilise. Ces 30 dernières années, l'industrie a de plus substitué une partie de sa consommation d'eau potable provenant de la distribution d'eau par du captage d'eau interne [39]. La nouvelle modélisation de la production représentée par l'arborescence de la figure 3 permet de tenir compte de l'usage de différents types d'eau (industrielle et potable) et

8. Le sigle CES abrège "Constant Elasticity of Substitution". Dans le cas présent, il est utilisé pour désigner un certain type de fonctions de production qui sont effectivement caractérisées par une élasticité de substitution constante (cf. [11]).

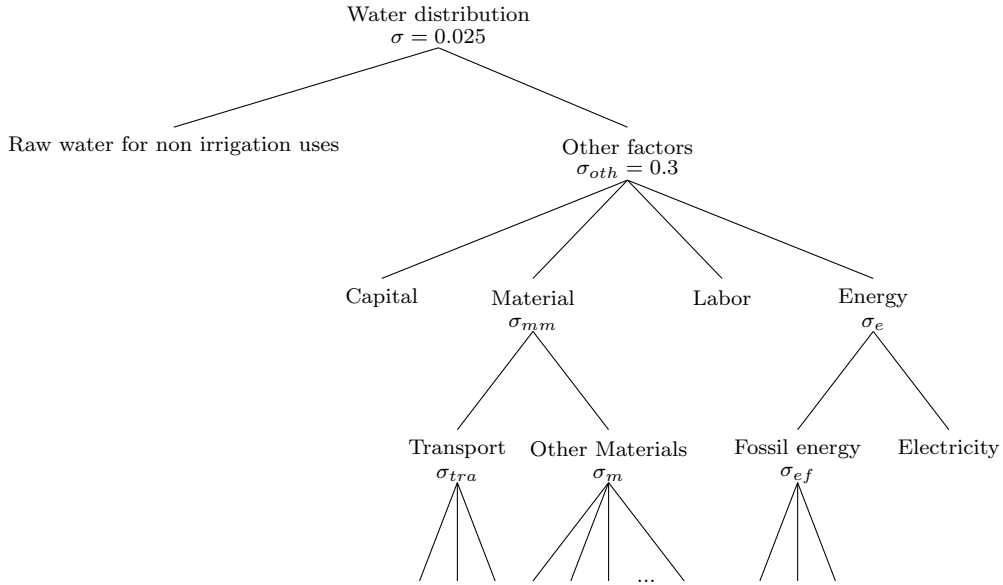


Figure 2 – Arborescence du secteur de la distribution d'eau

des possibilités de substitution entre ces dernières. Ainsi, les industries ont le choix entre l'emploi d'eau potable, achetée aux distributeurs, et le propre captage et distribution d'eau. Ceci paraît d'autant plus important que les tarifs pour l'eau potable diffèrent substantiellement des prix de l'eau industrielle captée directement, dont l'usage est réglementé par des concessions.

A nouveau, le choix des différentes élasticités de substitution revêt une grande importance. Tout d'abord, nous devons définir l'élasticité de substitution entre l'eau et les autres matières dans la production industrielle, dénotée σ_{ind} . La littérature montre que les possibilités de substitution entre l'eau, qu'elle soit industrielle ou potable, et les autres facteurs de production sont bien réelles. En effet, les processus de production peuvent souvent être modifiés de manière à devenir moins gourmands en eau, ou des systèmes de recyclage de l'eau peuvent par exemple permettre la réutilisation de la ressource. Nous optons dans cette étude pour une élasticité σ_{ind} égale à 0.3. Cette valeur correspond à l'élasticité de substitution entre capital et eau employée par Gomez et al. [45] et s'avère bien compatible avec l'étude de Goodman [48] qui teste des valeurs de 0.1, 0.25 et 0.5 pour l'élasticité de substitution entre l'eau et les autres facteurs de production. Il conclut qu'une élasticité de 0.1 est trop faible, puisqu'elle entraîne des prix de l'eau trop élevés. Cette élasticité permet aux secteurs industriels de s'adapter aux changements climatiques en utilisant des procédés de production plus ou moins friands en eau.

Ensuite, il convient d'attribuer des valeurs à l'élasticité de substitution entre eau potable et eau industrielle, σ_w . Il n'existe pas beaucoup d'études sur la possibilité de substituer de l'eau potable par de l'eau extraite directement par les entreprises. Reynaud [84] a réalisé une étude pour la France d'après laquelle les possibilités de substitution entre eau brute et eau potable paraissent globalement limitées. Plus particulièrement, la substituabilité entre eau brute et eau potable est plus faible lorsque l'eau brute ne requiert aucun traitement, par exemple dans les cas où elle est utilisée pour le refroidissement. En revanche, les résultats de Freiburghaus [39] indiquent la substitution en Suisse, ces 30 dernières années, d'eau potable par de l'extraction autonome d'eau brute dans les différents secteurs industriels. Afin que notre modèle puisse refléter ces possibilités, nous employons des élasticités positives, relativement faibles. Nous optons pour des élasticités $\sigma_w = 0.3$ en accord avec les valeurs trouvées dans [84] pour la substitution entre eau

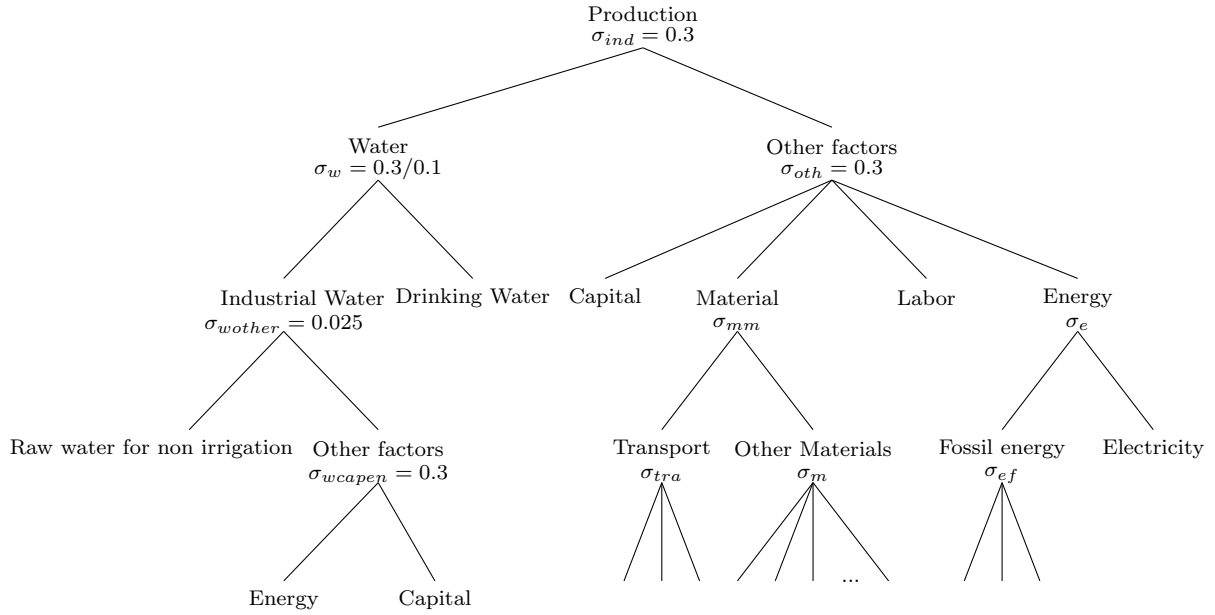


Figure 3 – Arborescence de la fonction de production des secteurs industriels où la consommation intermédiaire d’eau est explicitement représentée.

potable et eau brute traitée pour les secteurs qui traitent une partie importante de l’eau qu’ils captent selon [84]. Ces secteurs sont la métallurgie, la chimie et les biens de consommation. Les autres secteurs utilisent essentiellement de l’eau non traitée, dont la substituabilité avec l’eau potable est moindre, c’est pourquoi ces secteurs se voient attribués une élasticité $\sigma_w = 0.1$. Enfin, la définition des structures de production et l’intégration de l’eau dans ces dernières pour les secteurs agricoles et touristiques sont discutées dans les chapitres 3.3 et 5.5.

3 L’agriculture

3.1 Positionnement dans l’économie suisse⁹

Le poids de l’agriculture dans l’économie suisse est faible puisque le secteur primaire ne représentait que 1.2% du PIB en 2008. Du fait d’une productivité plutôt faible, son poids en terme de personnes actives occupées était déjà plus fort, de l’ordre de 4%. En revanche, elle joue un rôle social, patrimonial, paysager et environnemental encore très important. Outre les changements climatiques, ce secteur économique devra faire face à l’avenir aux défis posés par de nouvelles conditions de marché.

9. Tous les chiffres de cette sous-section sont tirés de [4].

3.2 Types et évaluations des impacts des changements climatiques

Au vu de la nature des activités agricoles, les impacts directs des changements climatiques seront nombreux et variés: hausse de la concentration de CO₂, hausse des températures (en toutes saisons), modification du régime des précipitations, augmentation du nombre d'événements extrêmes (sécheresse, vague de chaleur, tempêtes, fortes précipitations).

Un certain nombre d'études ont analysé l'impact direct des changements climatiques sur la production agricole suisse. L'impact sur la production du blé d'hiver et du maïs est relativement bien documenté ([37], [98] et [99]). D'une part, ceci s'explique par le fait que les surfaces dédiées à ces cultures sont importantes en Suisse. D'autre part, ces cultures jouent également un rôle primordial au niveau mondial dans l'alimentation humaine et animale. Étant donné la surface occupée par les prairies en Suisse, l'impact des changements climatiques sur ces dernières a aussi été analysé, par exemple dans [25]. Au niveau international, de très nombreuses études ont traité de l'impact du changement climatique sur la production agricole. Celles auxquelles nous nous référons discutent et estiment le plus souvent ces impacts en utilisant des modèles statistiques ([65], [66], [67], [68], [69]).

Le climat est l'un des plus importants facteurs limitatifs pour le secteur agricole suisse. De ce fait, non seulement l'amplitude mais également le sens de l'impact des changements climatiques sont incertains. Toutefois, les résultats des études existantes montrent que la production fourragère et les cultures ensemencées en automne/hiver (blé d'hiver, colza d'hiver) profiteront plutôt des changements climatiques alors que l'impact en sera plutôt négatif pour les cultures ensemencées au printemps (maïs). Enfin, les changements climatiques auront aussi des impacts sur l'élevage d'animaux. On attend de ces impacts qu'ils soient négatifs, principalement à travers la hausse des températures, les vagues de chaleur et les sécheresses. Jusqu'ici, nous avons abordé les impacts directs des changements climatiques mais les impacts indirects doivent aussi être pris en compte. D'une part, les changements climatiques sont susceptibles de favoriser l'apparition et le développement en Suisse de germes pathogènes, d'insectes nuisibles, de mauvaises herbes et d'espèces végétales aimant la chaleur qui diminueront les rendements des cultures et réduiront la valeur nutritive du fourrage. D'autre part, les changements climatiques pourraient avoir un impact indirect important sur l'agriculture suisse s'ils venaient à modifier tant le niveau que la variabilité des prix agricoles mondiaux.

3.3 Options d'adaptation face aux changements climatiques

Les mesures d'adaptation dans le secteur agricole peuvent être classées en trois grandes familles:

- Choix des cultures et des variétés ;
- Techniques culturales ;
- Gestion globale au niveau de la ferme.

Certaines mesures peuvent être adoptées pour un grand nombre de cultures différentes. Citons par exemple le changement dans les dates d'ensemencement ou le développement et l'utilisation de variétés plus adaptées aux nouvelles conditions climatiques. En particulier, Torriani et al. [99] montrent que le fait de changer les dates d'ensemencement réduit les impacts des changements climatiques pour le maïs. Pour le blé d'hiver, le colza d'hiver et le maïs, Torriani et al. [99] montrent aussi que le choix de cultiver des variétés avec un développement plus lent a un effet

positif sur le rendement moyen mais n'a pas d'impact positif sur la stabilité des rendements. D'autres mesures sont plus spécifiques à certaines cultures, comme l'irrigation pour les cultures qui sont semencées au printemps. Des simulations menées pour le maïs, toujours dans [99], montrent que l'irrigation augmente le rendement moyen et a une influence légèrement positive sur la variabilité du rendement. En revanche, Finger [37] note que les bénéfices économiques qui résultent de l'adoption d'un système d'irrigation ne sont pas suffisants pour déclencher des investissements importants dans ce domaine à l'avenir.

Le tableau 2 présente un certain nombre de mesures d'adaptation envisageables du côté des producteurs de biens agricoles en spécifiant lesquelles peuvent être qualifiées de mesures endogènes et lesquelles de mesures exogènes. Parmi ces mesures, le tableau 2 indique également celles qui sont prises en compte dans notre analyse.

Tableau 2 – Mesures d'adaptation envisageables pour les producteurs de biens agricoles et leur prise en compte dans le modèle GEMINI-E3.

Adaptation - côté offre	Endogène	Exogène	GEMINI-E3
Choix de variétés mieux adaptées	X		
Développement de nouvelles variétés		X	
Changer/Diversifier les cultures	X		X
Avancer les dates d'ensemencement	X		X
Assurances et dérivés climatiques	X		
Améliorer les prévisions météorologiques		X	
Irrigation	X1	X2	X1,X2

X = Adaptation indirectement prise en compte lors de l'estimation de l'impact des changements climatiques sur les rendements des cultures (cf. sous-section 9.2.1)

Par exemple, le modèle GEMINI-E3 permet de prendre en compte la réallocation des moyens de production des sous-secteurs agricoles qui seront fortement touchés par les changements climatiques vers ceux qui le seront moins. Cette forme d'adaptation est endogène puisque la réallocation des moyens de production est la conséquence des choix des producteurs et des consommateurs. Le choix de variétés mieux adaptées est aussi une option d'adaptation endogène qui n'est en revanche pas prise en compte dans notre analyse contrairement à l'avancement des dates d'ensemencement dont l'effet est capturé d'une manière indirecte dans nos estimations des impacts des changements climatiques sur les rendements des cultures (cf. sous-section 9.2.1). De leur côté, les pouvoirs publics pourraient contribuer à développer des variétés mieux adaptées aux nouvelles conditions climatiques ce qui, dans notre terminologie, constitue une adaptation exogène. Pour l'heure, cette mesure n'est pas intégrée dans notre analyse tout comme l'amélioration exogène des prévisions météorologiques.

En ce qui concerne l'irrigation, c'est une mesure dont le recours peut être décidé par le secteur privé mais dont une partie du financement peut être garanti par les pouvoirs publics. Comme l'indique le tableau 2, nous avons simulé dans le présent travail tant le volet endogène que exogène de l'irrigation. Une ressource d'eau brute a été intégrée au modèle GEMINI-E3. Une description détaillée de l'intégration de cette ressource dans le modèle se trouve sous 2.4.1. L'inclusion de l'eau permet d'analyser l'impact de l'irrigation dans l'agriculture. Nous pouvons ainsi tenir

compte d'éventuels besoins croissants d'irrigation et simultanément étudier les conséquences d'une diminution de la quantité d'eau disponible pour cet usage. En particulier, le modèle comporte une ressource en eau brute, que les agriculteurs doivent extraire eux-mêmes puis distribuer vers leurs cultures. En permettant la substitution de l'eau par du capital par exemple, le modèle intègre les possibilités d'adapter l'irrigation en optant pour des techniques moins sujettes aux pertes, et donc au gaspillage, de l'eau.

3.4 Représentation du secteur de l'agriculture dans GEMINI-E3

3.4.1 Désagrégation sectorielle de l'agriculture

La version standard du modèle GEMINI-E3 représente l'agriculture à l'aide d'un seul et unique secteur. Toutefois, les sous-sections précédentes montrent bien que tant les impacts que les options d'adaptation ne sont pas les mêmes pour l'ensemble des activités agricoles. Par conséquent, il est nécessaire de représenter le secteur agricole à l'aide de plusieurs sous-secteurs. L'information à la base de notre désagrégation est donnée par la base de données du GTAP (Version 6.0—année 2001, [29]). Les secteurs agricoles qui y sont détaillés sont présentés dans le tableau 3.

Tableau 3 – Secteurs agricoles détaillés dans la base de données du GTAP

Agricultural sectors	
1	Paddy rice
2	Wheat
3	Cereal grains n.e.c.
4	Vegetables, fruit, nuts
5	Oil seeds
6	Sugar cane, sugar beet
7	Plant-based fibers
8	Crops n.e.c.
9	Cattle,sheep,goats,horses
10	Animal products n.e.c.
11	Raw milk
12	Wool, silk-worm cocoons
13	Forestry
14	Fishing

Tous ces secteurs n'ont pas le même poids économique en Suisse comme en atteste la figure 4.

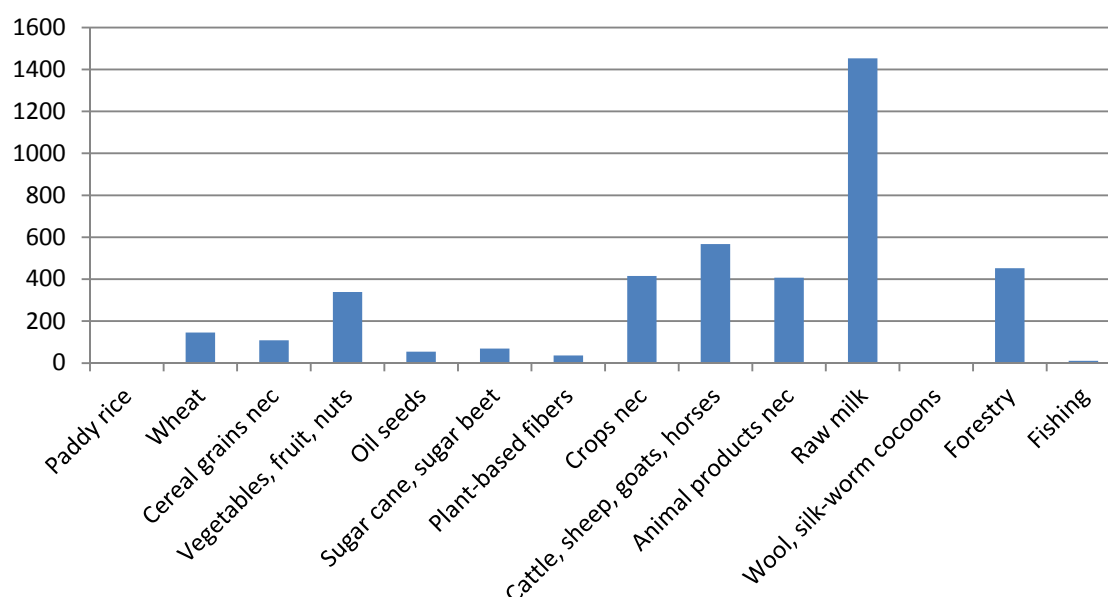


Figure 4 – Valeur ajoutée, pour la Suisse, des 14 sous-secteurs de l’agriculture définis dans la base de données du GTAP — en millions de US\$ de 2001. (Source: GTAP 6)

Il est important de remarquer qu’aucun de ces sous-secteurs ne fait référence aux “services multifonctionnels” de l’agriculture. Cela a pour conséquence que nous ne pourrions pas intégrer ces services à notre analyse.

La désagrégation du secteur agricole a été guidée par deux critères principaux. D’une part, nous avons cherché à créer des sous-secteurs économiquement pertinents tant en termes de poids économique que d’homogénéité. En fait, ce critère nous a surtout poussé à déterminer un nombre relativement restreint de sous-secteurs. D’autre part, nous avons essayé de définir des sous-secteurs où la problématique des changements climatiques se posent d’une manière spécifique. Sur la base de ces deux critères, nous avons donc défini les six sous-secteurs suivants :

Tableau 4 – Choix des sous-secteurs pour l’agriculture.

Sous-secteurs agricoles dans GEMINI-E3	Sous-secteurs du GTAP (Nombres selon tableau 3)
1 Raw milk	11
2 Animal products	9+10
3 Vegetables, fruits and nuts	4
4 Crops n.e.c.	8
5 Other agricultural products	1+2+3+5+ 6+7+12+14
6 Forestry	13

Comme on peut le voir, nous distinguons la production laitière (“Raw milk”) du reste de la production animale (“Animal products”). En ce qui concerne la production végétale, nous dis-

tinguons cultures fourragères (“Crops n.e.c.”) et cultures maraîchères (“Vegetables, fruits and nuts”) des autres cultures (“Other agricultural products”) ¹⁰.

3.4.2 La structure de production des secteurs agricoles

Afin de pouvoir au mieux représenter la structure de production des secteurs agricoles, un facteur de production “terre” est introduit dans GEMINI-E3. Ce facteur dénote la valeur de la terre agricole et est construit à partir des données pour 2001 de GTAP6. Seuls les secteurs agricoles utilisent le facteur terre comme input. La terre n’est pas mobile entre les secteurs agricoles: des terres employées pour la production de denrées agricoles appartenant par exemple au secteur des cultures maraîchères ne peuvent être allouées à la production laitière et vice-versa. Cette hypothèse reflète des différences de qualité entre ces terres. La figure 5 illustre la structure de production des secteurs de production laitière, production animale, cultures fourragères, cultures maraîchères et autres produits agricoles. Ces secteurs utilisent comme input un agrégat terre-irrigation qui représente la valeur de la terre et, pour les surfaces irriguées, l’eau ainsi que les installations et l’énergie nécessaires pour irriguer. Les deux secteurs de production animale emploient également un agrégat terre-eau, mais cette eau sert cette fois-ci à abreuver les animaux. Une élasticité de substitution de $\sigma = 0.2$, proche des $\sigma = 0.24$ employés dans les secteurs agricoles par Berrittella et al. [15], permet de remplacer l’agrégat terre-irrigation par d’autres inputs. La faible valeur de l’élasticité reflète la difficulté de ces substitutions. Le prochain niveau de l’arborescence dénote l’usage commun d’irrigation et de terre dans la production et la possibilité de substituer terre et irrigation avec une élasticité $\sigma_{lw} = 0.3$ pour les secteurs de production végétale. A noter que la valeur de la terre contient déjà la valeur intrinsèque des précipitations, et que la modélisation proposée du secteur agricole permet à ce niveau de tenir compte de l’irrigation comme possible stratégie d’adaptation en cas de diminution des précipitations. Dans la production laitière et animale, il n’est pas possible de remplacer du facteur terre par de l’eau et vice-versa, c’est pourquoi l’élasticité est nulle pour ces deux secteurs et les inputs terre et eau sont employés dans des proportions fixes, une modélisation que l’on retrouve par exemple dans Seung et al. [94]. Ensuite, la structure de production illustre la possibilité d’utiliser de l’eau potable ou encore de l’eau brute en combinaison avec de l’énergie et du capital pour irriguer les cultures et abreuver les animaux. Ce choix entre l’emploi d’eau potable et l’extraction directe d’eau brute est modélisé de manière identique dans les secteurs industriels (cf la section 2.4.3 pour plus de détails). L’eau brute est mobile entre les différents secteurs qui utilisent de l’eau pour irriguer les cultures d’une part et l’ensemble des autres secteurs du modèle d’autre part. En revanche, elle n’est pas échangeable entre ces deux entités. Cette représentation suppose l’attribution de droits d’utilisation de la ressource en eau pour l’irrigation qui ne sont pas échangeables avec les droits d’utilisation octroyés à d’autres secteurs. Cette distinction est introduite afin de pouvoir représenter séparément l’impact des changements climatiques sur la ressource en eau brute utilisée pour l’irrigation. Alors que les autres secteurs nécessitent de l’eau toute l’année, les secteurs agricoles qui irriguent les cultures ne l’emploient pas pendant les mois d’hiver. Or l’impact du changement climatique sur la disponibilité de la ressource d’eau brute diffère beaucoup entre l’été et l’hiver, c’est pourquoi il est intéressant de modéliser séparément les impacts pour les secteurs agricoles.

10. A noter que le sous-secteur “Crops n.e.c.”, tel que défini dans la base de données du GTAP, inclut des cultures qui ne sont pas des cultures fourragères et qu’inversement toutes les cultures fourragères ne sont pas incluses dans le sous-secteur “Crops n.e.c.”. Toutefois, l’équivalence entre “Crops n.e.c.” et cultures fourragères paraît raisonnable dans le cas de la Suisse.

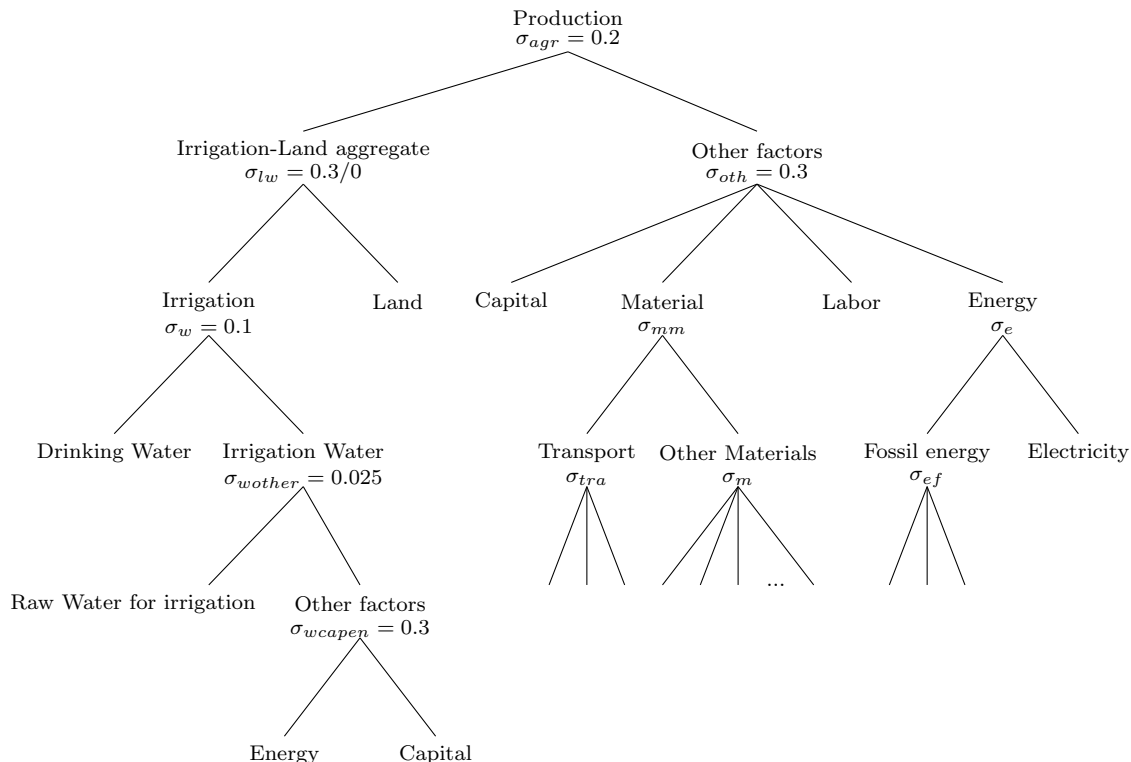


Figure 5 – Arborescence des secteurs agricoles

4 Le secteur de l'énergie

4.1 Introduction

Dans la perspective du changement climatique, la production et la consommation d'énergie sont généralement appréhendées dans une optique de réduction des émissions de gaz à effet de serre. En effet, ce secteur de l'énergie est perçu comme un des émetteurs importants de gaz à effet de serre. Toutefois, nous l'abordons dans ce projet plutôt comme une *victime* du changement climatique. Dans cette optique, les impacts d'un climat plus chaud et de conditions climatiques extrêmes sont envisagés ainsi que les mesures d'adaptation visant à les limiter.

Le climat est l'un des nombreux facteurs influençant le système énergétique suisse. Les principaux facteurs dans le passé ont été la croissance économique et démographique, les chocs pétroliers, le développement technologique et la libéralisation du marché de l'électricité. Dans le futur, les principaux enjeux seront comment satisfaire la demande d'électricité en prenant en compte l'arrêt de la première génération de réacteur nucléaire, tout en réduisant les émissions de CO₂ et en intégrant la raréfaction des énergies fossiles.

Cette revue de la littérature se concentre sur les études réalisées et les articles publiés sur les impacts du changement climatique sur le système énergétique en Suisse. Elle comprend des évaluations qualitatives et quantitatives des impacts du changement climatique ainsi que lorsque celles-ci sont disponibles des possibles mesures d'adaptation. La couverture géographique se limite à la Suisse ; des études sur les autres parties du monde sont aussi intégrées en particulier lorsque les résultats de ces études complètent les analyses réalisées sur la Suisse.

Les précédentes études sur le sujet [75] et [83] fournissent une bonne base et donnent des exemples illustratifs pertinents. Dans cette section, nous ne cherchons pas à faire une étude exhaustive sur un sujet précis, mais cherchons à donner une vue concise incluant tous les sujets pertinents, et ceci avec l'objectif d'intégrer ces mécanismes dans une représentation économique du système énergétique suisse pour évaluer *in fine* les impacts du changement climatique et les possibilités d'adaptation.

Nous examinons dans un premier temps les impacts et les mesures d'adaptation sur l'offre du système énergétique, puis nous étudions la demande, pour ensuite analyser les échanges extérieurs. Enfin, nous finissons par étudier les aspects liés au transport d'énergie. Comme point de départ, la figure 6 présente une vision synthétique des flux d'énergie en Suisse en incluant les échanges extérieurs.

4.2 L'offre d'énergie

En Suisse, la production d'électricité est réalisée principalement par l'hydraulique (56%) et le nucléaire (39%). Le solde (5%) est partagé par des moyens de production divers incluant la production d'électricité à partir de l'incinération des déchets et les nouvelles sources renouvelables. Le défi principal auquel fera face le secteur sera de satisfaire la demande croissante d'électricité compte tenu de la fin des contrats d'achat de long terme d'électricité provenant de la France et de l'arrêt des réacteurs nucléaires de première génération aux alentours des années 2020. Du côté de l'offre, les principales solutions sont, en théorie, le développement du renouvelable, la construction de cycle combiné au gaz (CCGT), le remplacement des réacteurs nucléaires et/ou l'augmentation des importations. Les centrales au gaz peuvent être construites assez rapidement mais entraîneront des émissions importantes de CO₂. Surtout, la construction de centrales nucléaires n'est plus à l'ordre du jour suite à la nouvelle stratégie énergétique du Conseil fédéral qui prévoit un abandon progressif de cette forme d'énergie.

4.2.1 L'hydraulique

Des études approfondies sur les effets du changement climatique sur la production hydraulique dans les Alpes suisses ont été réalisées par le laboratoire ECHO (anciennement HYDRAM) de l'EPFL (cf. [54, 55]). Ces études sont basées sur 19 différents scénarios climatiques de modèles régionaux et globaux, partant tous des scénarios SRES A2 et B2 pour la période allant de 2070 à 2099. Ces scénarios sont recalibrés pour les périodes allant de 2020 à 2049 pour former un scénario appelé "scénario +1 °C" qui suppose un accroissement moyen de la température de 1.2 °C et une baisse des précipitations de 2% en moyenne annuelle. Les précipitations dans les Alpes sont supposées augmenter en hiver et baisser en été, avec une baisse moyenne annuelle de 7%. En utilisant un modèle hydrologique, calibré sur la période 1961-1990, ils analysent les effets du changement climatique sur les débits de 11 bassins versants alpins.

Un résultat important est que l'effet de l'augmentation de l'évapotranspiration¹¹, due aux températures plus élevées, l'emporte sur la fonte des glaciers. La réduction estimée des débits des rivières varie entre 5% et 15% selon les différents bassins pour la période 2020-2049 [54]. En outre, la variabilité annuelle des débits augmentera vraisemblablement, en effet le régime hydrologique devrait être moins dépendant de la neige et de la fonte des glaciers et plus lié aux

11. L'évapotranspiration est la somme de l'évaporation et de la transpiration des plantes qui conduit à un dégagement de vapeur d'eau de la surface de la terre vers l'atmosphère.

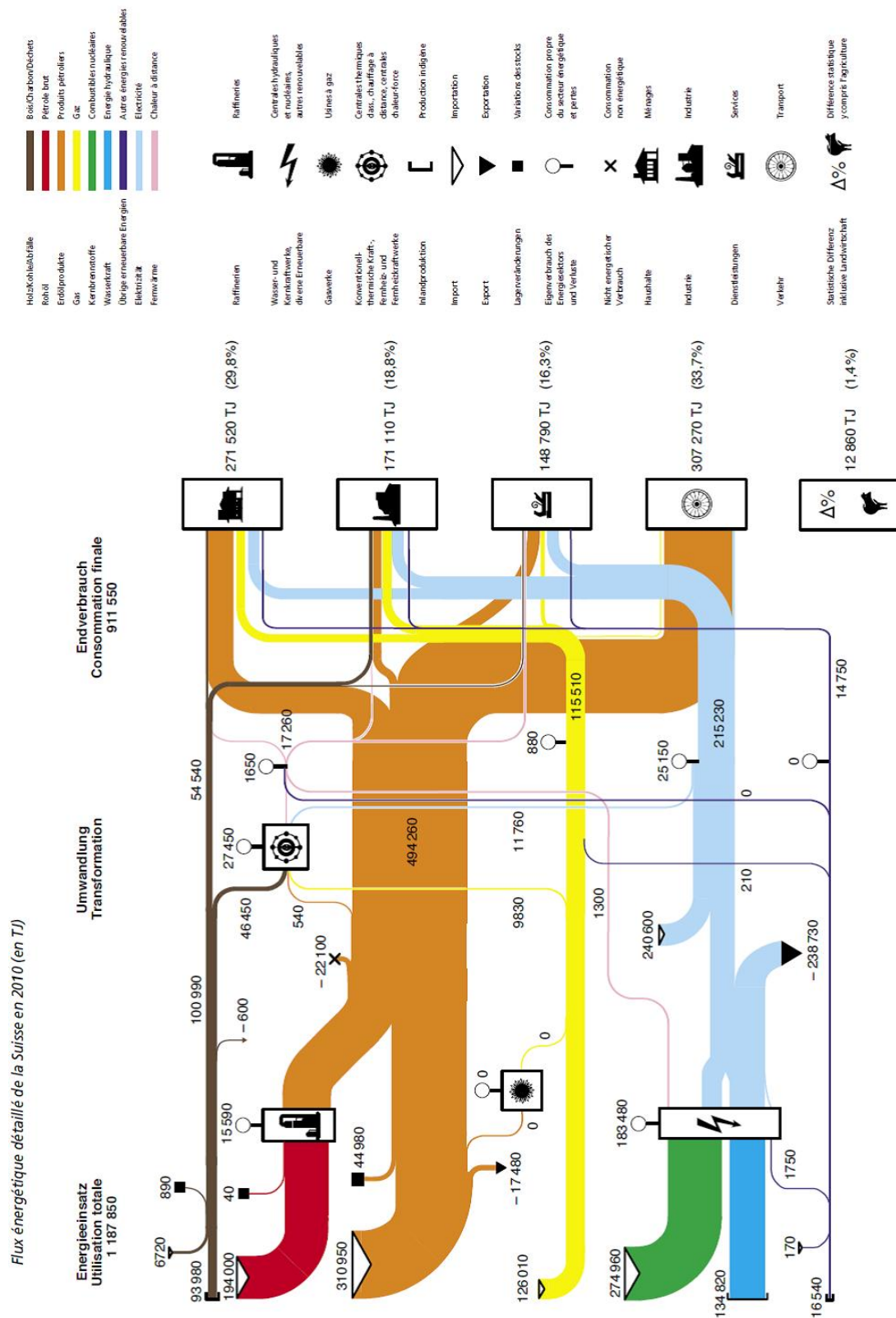


Figure 6 – Représentation des flux d'énergie pour la Suisse en 2010 (en TJ). (Source: Statistique globale suisse de l'énergie 2010, Office fédéral de l'énergie)

pluies. Au cours d'une année, la fonte des glaciers et de la neige du printemps devrait avancer de 15 jours et en été les débits devraient diminuer [54].

L'effet attendu de ces changements sur la production hydroélectrique est le suivant: la production hydraulique au fil de l'eau de même que celle liée aux barrages devraient décroître de 7% en moyenne annuelle, soit une baisse de 2.5 TWh par année. Comme le pompage est réalisé dans un système fermé, aucun effet n'est attendu. En prenant en compte l'accroissement de la demande d'électricité, la production hydraulique d'électricité devrait couvrir seulement 46% des besoins de la consommation en 2035 [82], à comparer à sa contribution actuelle égale à 60%.

Plus récemment, un projet de recherche de trois ans, terminé en 2011, a étudié les effets du changement climatique sur l'utilisation de la force hydraulique en Suisse en se basant sur six cas d'étude [6]. Les résultats prédisent peu de changements à l'horizon 2035 avec une tendance plutôt à une légère diminution de la production hydraulique dans les régions de haute altitude du sud et de l'est du Valais tandis que la production des centrales localisées dans les régions de plus basse altitude des Préalpes centrales et orientales devrait augmenter de 0 à +9%. A l'horizon 2085, la baisse de production au sud et à l'est du Valais s'accroîtrait avec des pertes de production qui devrait se situer en moyenne dans la fourchette entre 4 et 8%. Toutefois, l'étude admet que ces résultats ne peuvent pas être généralisés à l'ensemble du parc des centrales hydroélectriques.

En outre, les événements météorologiques extrêmes comme des longues périodes de sécheresse et de fortes tempêtes devraient augmenter dans le futur [75]. Cela devrait conduire à des interruptions dans la production hydroélectrique comme cela a été le cas durant l'été caniculaire 2003 et l'automne pluvieux en 2005.

Des changements futurs qui affecteront la production hydroélectrique suisse qui ne sont pas directement liés aux changements climatiques sont décrits dans une étude sur l'expansion de l'hydraulique en Suisse [63]. En résumé, en 2035, une production additionnelle annuelle de 0.8 à 4.3 TWh est attendu, ce qui correspond à une augmentation de 2% à 12%.

4.2.2 Le nucléaire

Les 5 réacteurs nucléaires en Suisse utilisent un cours d'eau comme source de refroidissement. Les centrales les plus anciennes (Beznau I, II, Mühleberg) utilisent un *circuit ouvert* de refroidissement, en prélevant puis en restituant en totalité l'eau dans la rivière. Les centrales plus récentes (Gösgen, Leibstadt) fonctionnent en *circuit fermé*, en utilisant des réfrigérants atmosphériques qui refroidissent l'eau prélevée grâce à des échanges avec l'air de l'atmosphère. Dans les deux cas, l'augmentation de la température des cours d'eau réduit l'efficacité du refroidissement et peut conduire à réduire la puissance de la centrale pour se prévenir d'une surchauffe. Une contrainte additionnelle pour les centrales en circuit ouvert est liée à la limite de température concernant l'eau qui est reversée dans le cours d'eau pour prévenir des dommages sur l'écosystème [103].

Au cours de la vague de chaleur de l'année 2003, quelques centrales nucléaires ont dû réduire leur production. L'effet total est estimé¹² à 4% de la production annuelle des centrales en 2003 [31]. L'impact le plus important a été relevé pour la centrale de Leibstadt, avec une baisse de production de 10% sur certains jours chauds des mois de mai, juin et juillet. Le problème a surtout été le manque de disponibilité momentanée de puissance plus que la perte d'énergie.

12. Ce chiffre est une estimation assez grossière qui suppose que les centrales ont réduit leur production de 25% pendant deux mois. Il faut d'ailleurs noter que si l'on considère les statistiques sur la production (Nuklearforum Schweiz / Forum nucléaire suisse, 14.08.2003), on trouve une estimation inférieure à 1%.

Ceci est particulièrement vrai pendant les jours de forte chaleur où la demande d'électricité est forte pour satisfaire des besoins de climatisation des bâtiments.

Il est difficile de prévoir dans le futur l'occurrence des événements extrêmes tels que les périodes de chaleur. Compte tenu de notre climat actuel, l'année 2003 a représenté une année exceptionnelle. Cependant les modèles climatiques montrent qu'à la fin de notre siècle de tels événements extrêmes pourraient devenir la norme [89].

Au regard de l'adaptation, la construction d'équipements de refroidissement additionnels pourrait être réalisée ou d'autres méthodes de refroidissement pourraient être utilisées. Pour une description de ces possibilités, on peut se référer à [70]. En outre, l'impact lié à l'indisponibilité des moyens de production peut être limité par l'utilisation de *smart grid technologies* permettant de mieux gérer la demande et par la construction de capacités décentralisées de stockage et de production d'électricité.

4.2.3 Les centrales thermiques classiques

Le refroidissement des centrales thermiques classiques sera lui aussi affecté par les mêmes problèmes que ceux que nous avons décrits dans la sous-section précédente. C'est un élément important à prendre en compte étant donné que les centrales thermiques classiques seront amenées probablement à remplacer une partie significative de la capacité des centrales nucléaires actuelles.

4.2.4 Éolien, photovoltaïque et biomasse

La production d'électricité à partir de nouvelles sources renouvelables sera aussi affectée par le changement climatique. Le facteur le plus important ne sera pas un effet direct mais plutôt une conséquence indirecte liée aux politiques de réduction des gaz à effet de serre: les énergies renouvelables seront dans ce cas développées et leur contribution augmentera dans le futur. En Suisse, la sortie programmée du nucléaire constituera aussi un paramètre central de leur développement. L'Office fédéral de l'énergie a débuté un plan d'action en leur faveur avec pour objectif d'augmenter la part des énergies renouvelables de 50% en 2020 pour atteindre environ 24% de la consommation totale d'énergie. En 2035, les nouvelles énergies renouvelables devraient contribuer à hauteur de 5.5 TWh à la production d'électricité. Cela correspond par rapport à la production d'électricité actuelle à une augmentation de la part de ces énergies renouvelables de 3% à 10%.

Des estimations plus détaillées sont disponibles pour le développement de l'énergie éolienne [75]. Le potentiel total de toutes les fermes éoliennes en Suisse est estimé à 1.15 TWh par an avec une production additionnelle de 2.85 TWh par an compte tenu d'une diffusion décentralisée de l'éolien. Le potentiel total pourrait être réalisé en 2050. La production éolienne potentielle annuelle en 2035 est estimée à 0.6 TWh. Ces productions additionnelles sont importantes par rapport à la production actuelle de l'éolien (18.5 GWh en 2008), mais d'ampleur limitée si l'on considère la production d'électricité totale (67 TWh en 2008).

Concernant les impacts directs du changement climatique sur le renouvelable, il est pertinent de différencier les types d'énergie. Pour l'éolien, une augmentation de la vitesse du vent a été envisagée et une augmentation de la fréquence des tempêtes est prévue [40]. Le premier élément devrait augmenter la production, alors que le second devrait conduire à des interruptions de la production et donc la diminuer. La quantité de biomasse disponible pour la production d'électricité (de même que pour le chauffage) devrait augmenter suite au réchauffement climatique. Les principales raisons sont l'expansion des zones boisées et l'augmentation de la disponibilité de bois

suite aux tempêtes dues à un climat plus chaud et plus venteux [75]. En 2030, l’irradiation solaire est supposée croître de 5% [8], cela augmentera le potentiel de production du photovoltaïque de même que celui de la production d’eau chaude solaire.

4.2.5 Énergie fossile

La Suisse important en totalité ses énergies fossiles (cf. la section 4.4), l’effet du changement climatique sera indirect: la taxe sur le carbone rendra les énergies fossiles plus coûteuses. Au 1^{er} janvier 2010, la taxe sur le CO₂ appliquée sur les énergies de chauffage (produits pétroliers, gaz naturel et charbon) est de 36 francs par tonne de CO₂. Actuellement, un “centime climatique” plutôt qu’une taxe sur le CO₂ est prélevé sur les carburants utilisés pour le transport (essence et diesel).

4.3 La demande d’énergie

Les tableaux 5 et 6 présentent la consommation d’énergie en Suisse avec des projections pour l’avenir, en prenant en compte l’influence du changement climatique. Ces projections sont détaillées par la suite en distinguant les secteurs consommateurs d’énergie (ménages, industrie, services, agriculture et transport). Ces projections sont basées sur 4 scénarios qui sont décrits dans les *perspectives énergétiques 2035* de l’Office fédéral suisse de l’énergie. Elles ne peuvent pas être comparées aux résultats présentés à la section 9 pour le secteur de l’énergie, en particulier les projections des scénarios 2–4 qui incluent des politiques climatiques plus ambitieuses, car les scénarios simulés avec GEMINI-E3 sont différents.

Tableau 5 – Consommation finale d’énergie en Suisse par secteur. (Source : [3, 5])

Consumption (PJ / year)	in 2008	in 2035 (<i>including effects of climate change</i>)			
		Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
Households	254	248 (238)	239 (230)	209 (199)	183 (172)
Industry	179	182 (180)	178 (175)	161 (160)	134 (134)
Service & Agriculture	157	161 (157)	141 (137)	135 (133)	107 (105)
Transport	310	237 (238)	224 (224)	193 (194)	167 (168)
Total	900	829 (812)	781 (766)	698 (685)	591 (579)

Le premier scénario représente le compte de référence et suppose une continuation des politiques d’efficacité énergétique prises avant 2005. Dans le scénario 2, il est supposé une coopération entre privé et public et la mise en œuvre de mesures de politique économique plus strictes, incluant une taxe sur le carbone et des subventions pour les énergies renouvelables. Alors que la philosophie des deux premiers scénarios est exploratoire, *i.e.* les politiques économiques sont données et leurs effets sont étudiés, la logique des deux derniers scénarios est *goal-oriented*, *i.e.* on se donne des objectifs en terme de production et de consommation, et les moyens nécessaires pour atteindre ces objectifs en sont dérivés. Le scénario 3 a pour objectif une réduction de 20% de la consommation d’énergie et d’émission de CO₂ par rapport à l’année 2000. Il est atteint par la mise en place de normes sur les bâtiments et les véhicules et par l’introduction d’une taxe sur les énergies fossiles et l’électricité. Le scénario 4 appelé *vers une société à 2000 watts* suppose des modifications importantes de l’usage de l’énergie au niveau mondial. Grâce à la mise en œuvre coordonnée de taxes, de subventions et de normes, une baisse de 35% de la consommation d’énergie et des

Tableau 6 – Consommation finale d’énergie en Suisse par énergie. (Source : [3, 5])

Consumption (PJ / year)	in 2008	in 2035 (<i>including effects of climate change</i>)			
		Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
Petrol & Diesel	298	220 (221)	193 (194)	158 (158)	130 (130)
Heating Oil	198	150 (137)	137 (125)	104 (96)	81 (74)
Natural Gas	111	122 (113)	118 (109)	108 (101)	88 (82)
Electricity	211	246 (256)	233 (243)	216 (223)	186 (193)
Others ¹	82	91 (86)	101 (95)	113 (107)	99 (100)
Total	900	829 (812)	781 (766)	698 (685)	583 (579)
Total non-electricity	689	583 (556)	548 (523)	482 (463)	397 (386)

¹ This includes wood, coal, industrial waste, wind, biogas, biofuel, solar, geothermal, district and ambient heat.

émissions de CO₂ est atteint en 2035. On se référera à [60] pour une description détaillée de ces scénarios.

Par le passé, l’accroissement de la consommation d’électricité a été à peu près proportionnelle à la croissance économique. Par rapport à la consommation d’énergie fossile, la demande d’électricité est supposée augmenter plus vite, dû à des mesures d’efficacité énergétique (comme les pompes à chaleur) et à l’augmentation du prix des énergies fossiles.

4.3.1 Les ménages

Une étude détaillée de la consommation d’énergie des ménages a été menée dans le cadre des *perspectives de l’énergie 2035* [52] par l’Office fédéral de l’énergie. En utilisant un modèle Bottom-up, les usages énergétiques des ménages ont été étudiés pour les 4 scénarios en intégrant de plus pour chacun d’eux l’hypothèse d’un climat plus chaud.

Le “climat plus chaud” est défini comme une augmentation de 1.25°C de la température en moyenne annuelle, conduisant à une augmentation de 2°C en juin, juillet et août et de 1°C pour les autres mois. Cette hypothèse est cohérente avec les scénarios climatiques régionaux pour la Suisse en 2035 observés dans le cadre des scénarios SRES A2 et B2 (cf. la section 4.2).

Dans le cas d’un climat plus chaud, la demande de chauffage est réduite en hiver et l’usage de la climatisation augmente en été. Une évaluation peut être réalisée en calculant la variation des “heating degree-days” et des “cooling degree-days”. Ils sont à peu près proportionnels à l’énergie utilisée pour chauffer ou refroidir les locaux¹³. Outre les usages liés à la régulation thermique des locaux, l’étude considère les impacts sur la consommation des réfrigérateurs et des congélateurs de même que les impacts sur la production d’eau chaude. Sur la base d’une étude comparative des autres pays industrialisés, Hofer [52] estime qu’en 2035 environ 50% des ménages suisses seront équipés d’une climatisation.

Au total, l’effet du changement climatique conduirait à une baisse de 4% à 6% de la consommation d’énergie des ménages pour l’année 2035. En revanche, la consommation d’électricité augmenterait de 3% à 5% suite au climat plus chaud. Au niveau des coûts, la plus forte demande d’électricité emporterait, conduisant à des coûts additionnels de 1.1 à 4.4 milliards de

13. Nous allons utiliser la méthode des “degree-days” plus loin dans le rapport. Se référer à la sous-section 9.3.1 pour une description détaillée de la méthode et de son utilisation pour évaluer les besoins en énergie pour le chauffage et l’air conditionné.

francs¹⁴. Le scénario 1 induirait les coûts additionnels les plus faibles pour les ménages, au contraire du scénario 4, qui conduirait à la hausse la plus forte des coûts.

4.3.2 L'industrie

Les perspectives énergétiques de l'OFEN ont aussi étudié la consommation d'énergie de l'industrie dans le futur pour les différents scénarios en prenant de plus en compte une variante intégrant un climat plus chaud [13]. Un des résultats est que les politiques les plus restrictives en matière de consommation d'énergie sont moins sensibles aux changements climatiques. En effet, les bâtiments bien isolés avec une efficacité énergétique élevée (en matière d'équipement de chauffage et de climatisation) sont moins sensibles aux variations de température extérieure. Dans le cas du scénario 4, la réduction d'énergie de consommation est de 1.6% à 1.7% avec une augmentation de la demande d'électricité de 0.7%.

L'étude n'analyse que l'effet de températures plus élevées sur les consommations d'énergie de l'industrie. Les changements structurels de la production industrielle consécutifs aux changements climatiques, tels que le basculement vers des industries faiblement émettrices, ne sont pas pris en considération.

4.3.3 Les services et l'agriculture

Les mêmes phénomènes qui ont été étudiés pour les ménages et l'industrie peuvent être appliqués pour les services et l'agriculture : un climat plus chaud réduit la demande de chauffage et augmente la consommation d'air conditionné, conduisant à une baisse des consommations d'énergie et une augmentation de la demande d'électricité. En utilisant une méthodologie identique aux secteurs précédents, Aebischer et Catenazzi [8] ont quantifié ces effets.

Les modèles montrent que la consommation totale d'énergie baisserait de 2% à 3% mais que, dans le même temps, la consommation d'électricité augmenterait de 6% à 7%. Cette hausse serait attribuable pour 60% à une augmentation des locaux équipés de climatisation, et pour le reste à une utilisation plus importante de ces équipements pendant les périodes chaudes.

4.3.4 Les transports

Les impacts du changement climatique sur la consommation d'énergie des transports ont aussi été étudiés [59]. Le principal effet est l'augmentation des consommations d'énergie suite à un usage plus important de l'air conditionné dans les véhicules. Cet effet conduirait à une augmentation de la consommation de 0.4% pour un réchauffement de 2 °C. D'autres impacts, comme l'augmentation de la consommation d'électricité pour la climatisation des trains, sont envisageables mais n'ont pas été évalués.

4.4 Les importations et exportations d'énergie

La modélisation du système énergétique suisse, outre la représentation de la production et de la consommation, se doit de prendre en compte les échanges d'énergie avec l'étranger. Toutes

14. Aux prix de l'année 2003.

les énergies fossiles sont importées et aucune conséquence directe des changements climatiques n'est prévue sur ces importations. La situation du secteur de l'électricité est plus complexe.

La production hydraulique est caractérisée par une forte saisonnalité et une grande flexibilité (démarrage et arrêt très rapide, capacité de stockage). Ceci conduit la Suisse à être un importateur net d'électricité durant la nuit (les stations de pompage peuvent utiliser une électricité bon marché) et l'hiver (dû à une production hydraulique faible et une demande de chauffage importante). En été et pendant les heures de pointe, la Suisse se transforme en un exportateur net d'électricité. En moyenne annuelle, la Suisse est traditionnellement un exportateur net d'électricité, 2005 ayant représenté la première année pour laquelle la Suisse est devenue un importateur net. Dans les années récentes, les importations et les exportations d'électricité ont été à peu près équilibrées.

Les politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre, spécialement la mise en place de la directive européenne sur les quotas d'émission, ont conduit à une augmentation du prix de l'électricité produit à partir des énergies fossiles. En moyenne, l'électricité produite au sein de l'Union Européenne provient à 50% de sources n'émettant pas de CO₂, alors que la Suisse n'en émet presque pas pour produire la sienne. La mise en place d'un prix du carbone devrait donner un avantage aux exportations suisses et au contraire renchérir le coût des importations.

4.5 Le transport d'énergie

Outre la production et la consommation d'énergie, le transport de l'énergie doit être pris en considération quand on souhaite évaluer les impacts du changement climatique sur le système énergétique. Le plus vulnérable est sans aucun doute la transmission d'électricité, les lignes électriques n'étant majoritairement pas enterrées. Avec l'augmentation des tempêtes [14], les perturbations liées au transport et à la distribution d'électricité deviendront plus fréquentes. Une évaluation est difficile mais des effets spécifiques, tels que des chutes de branches sur les lignes, ont été modélisés pour la région de Genève [44]. En outre, le réchauffement climatique devrait conduire à une fonte du permafrost dans les Alpes avec des effets négatifs sur la stabilité des lignes électriques qui les traversent [80].

Les adaptations possibles contre la vulnérabilité des réseaux de transports incluent la construction de centrales de production décentralisées et l'enterrement des lignes électriques. Cependant, l'enterrement des lignes électriques a un coût dix fois plus élevé comparé au système classique aérien.

4.6 Représentation de la production d'électricité dans GEMINI-E3

Afin de prendre en compte les impacts du changement climatique sur le secteur électrique, nous avons modifié la représentation du secteur électrique dans GEMINI-E3. Cette production est maintenant représentée à partir d'un emboîtement de CES décrivant explicitement les capacités installées dans les différents types de centrale. La nouvelle arborescence retenue est présentée à la figure 7. La formalisation distingue l'activité de génération d'électricité des autres activités (distribution et transport d'électricité) qui utilisent du travail, du capital et de l'électricité, qui restent communes à l'ensemble des filières et qui apparaissent donc en haut de l'arborescence. L'activité de génération d'électricité est supposée être réalisée avec seulement du capital (représentant les centrales électriques) et du combustible (parfois celui-ci est absent dans le

cas par exemple du renouvelable). Nous n'associons pas de charges de main d'œuvre et de consommations intermédiaires à chacune des filières (centrale thermique classique, nucléaire, renouvelable...) ce qui veut dire qu'elles sont globalisées. Cela se justifie pour deux raisons:

- Tout d'abord, il n'y a pas de différence importante entre les dépenses de personnel pour faire fonctionner une centrale nucléaire ou une centrale à charbon (du moins au niveau du secteur électrique dans son ensemble) ;
- Ensuite, ces dépenses ont un poids limité dans le coût de production de l'électricité. Englober ces dépenses et les supposer associées aux activités de distribution et de transport de l'électricité n'est donc pas une simplification abusive.

La modélisation distingue six filières:

- Les centrales électronucléaires ;
- Les centrales à charbon ;
- Les turbines à gaz ;
- Les centrales à fuel ;
- L'énergie hydraulique ;
- Les autres énergies renouvelables.

L'arbitrage est d'abord réalisé entre les centrales thermiques classiques (charbon, gaz naturel et fuel) prises globalement et les 3 autres filières (nucléaire, hydraulique et renouvelable). La production d'électricité à partir d'énergie fossile est ensuite répartie entre centrales à charbon, à gaz naturel et fuel. Pour chacune des centrales, le modèle prend en compte la capacité installée (exprimée en GWe) dont l'évolution dépend des décisions d'investissement et du déclassement des équipements existants. Pour les énergies renouvelables, nous prenons en compte une ressource qui pourra être affectée par les changements climatiques.

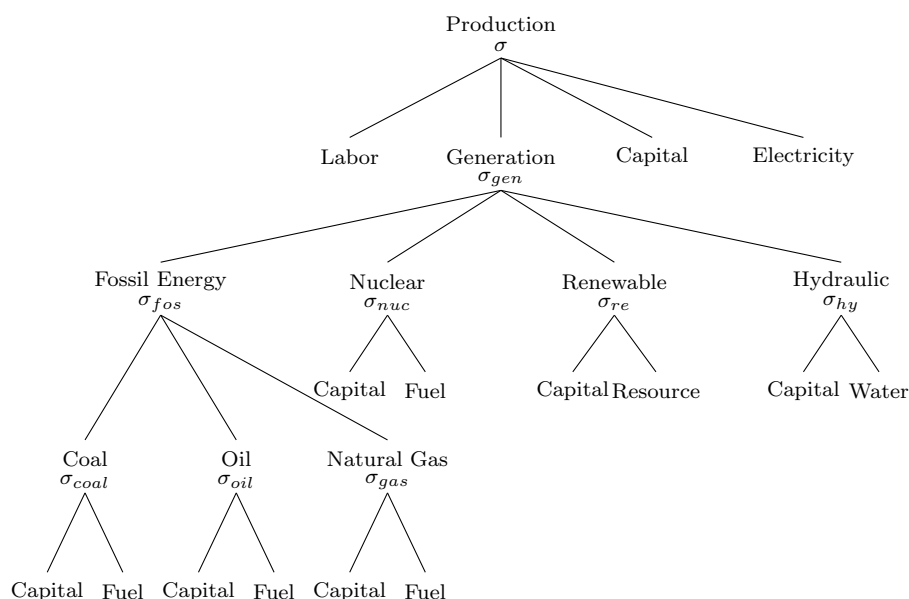


Figure 7 – Arborescence de la production d'électricité

4.7 Les mesures d'adaptation face au changement climatique

Le tableau 7 résume les possibilités d'adaptation du secteur énergétique face au changement climatique en distinguant le côté de l'offre de celui de la demande. Il prend pour base les possibilités

d'adaptation décrites dans les sous-sections précédentes.

Tableau 7 – Mesures d'adaptation envisageables dans le secteur de l'énergie

Adaptation - côté offre	Endogène	Exogène	GEMINI-E3
Baisse du taux d'utilisation des centr. nucléaires lors de canicules	X		X
Investissement dans des équipements de refroidissement des centrales	X		
Enfouissement des lignes électriques	X	X	
Surveillance des zones de permafrost	X	X	
Investissement dans des équipements de distribution et de stockage	X1	X2	X1
Adaptation - côté demande			
Mise en place d'air conditionné	X		X
Baisse de la demande de chauffage	X		X
Demand Side Management (incluant les "smart grids")	X	X	
Augmentation de l'efficacité énergétique	X1	X2	X1

X = Adaptation prise en compte dans l'estimation des impacts des changements climatiques introduits dans GEMINI-E3

5 Le tourisme

5.1 Définition et poids dans l'économie suisse¹⁵

Au sens de la comptabilité nationale, le tourisme a une définition plus large que celle qui est communément admise dans la vie de tous les jours. En effet, l'acception englobe "*les activités déployées par les personnes au cours de leurs voyages et de leurs séjours dans les lieux situés en dehors de leur environnement habituel pour une période consécutive qui ne dépasse pas une année, à des fins de loisirs, pour affaires ou autres motifs*"¹⁶ [77]. C'est la définition du tourisme que nous employons dans ce rapport.

Le poids du tourisme dans l'économie suisse est non négligeable puisque ce secteur représentait 2.9% du PIB en 2005 (contre 3.1% en 2001). Les revenus touristiques directs générés par les visiteurs étrangers atteignaient 12.6 milliards de francs en 2005 ce qui place le secteur du tourisme parmi les premiers secteurs exportateurs suisses. Du fait d'une productivité relativement faible, le secteur touristique joue un rôle plus important pour l'emploi que pour la valeur ajoutée. En 2005, le secteur comptait ainsi pour 4.4% de l'emploi total en équivalent plein temps. Comme pour l'agriculture, le tourisme joue un rôle social important dans la mesure où il contribue à créer de nombreuses places de travail dans des régions périphériques de montagnes faisant face à un problème structurel de sous-emploi.

15. Toutes les valeurs de cette sous-section sont tirées de [12].

16. Puisque la définition est large, il est important de noter qu'elle s'accompagne de nouvelles notions comme celle de "tourisme d'affaires".

5.2 Types et évaluations des impacts des changements climatiques

En Suisse, on distingue le tourisme selon qu'il est "urbain", "rural" ou "alpin" c'est-à-dire selon l'emplacement où les activités touristiques sont réalisées. Bien que les changements climatiques auront un impact sur ces trois formes de tourisme, ils concerneront avant tout le tourisme "alpin". D'une part, cela s'explique par l'environnement alpin fortement sensible aux variations climatiques et, d'autre part, par la nature des activités touristiques tant estivales qu'hivernales pratiquées dans les Alpes.

Trois études ont jusqu'à présent tenté de chiffrer l'impact des changements climatiques sur le secteur du tourisme en Suisse. L'étude de Müller et Weber [72] s'est concentrée sur le tourisme "alpin", en analysant les conséquences des changements climatiques pour l'Oberland bernois. A l'horizon 2030, ils estiment la perte annuelle de chiffre d'affaires durant la saison d'hiver à 200 mio. CHF. Toutefois, cette perte pourrait être réduite annuellement de 80 mio. CHF par une hausse de la fréquentation estivale et de 50 mio. CHF par la mise en place de mesures d'adaptation adéquates. Le fait que le tourisme estival gagne en importance avec les changements climatiques paraît vraisemblable. Serquet et Rebetez [93] ont par exemple montré qu'il existait généralement une corrélation positive entre les périodes de forte chaleur en plaine et le nombre de nuitées hôtelières dans les stations suisses de montagne¹⁷. Pour l'ensemble de la Suisse et à l'horizon 2050, l'étude de Meier [71] a estimé des coûts des changements climatiques de l'ordre de 1800 à 2300 mio. CHF pour le tourisme "alpin" dont 1600 à 2100 mio. CHF rien que pour la saison d'hiver. Ces deux études montrent clairement combien les changements climatiques sont d'abord un problème pour la saison d'hiver à travers la détérioration des conditions d'enneigement naturel. De plus, l'étude de Müller et Weber montre que, pour la saison hivernale, le tourisme d'excursion (sans nuitée) va être plus fortement touché par les changements climatique que le tourisme impliquant des nuitées. Ce résultat s'explique par le fait que les skieurs-excursionnistes se rendent en majorité dans les stations proches de chez eux, à savoir des stations de basse et moyenne altitude qui subiront plus frontalement les effets des changements climatiques (cf. [7], [10], [22] et [100]). La vulnérabilité de ces stations aux changements climatiques est aussi plus grande du fait d'une capacité d'adaptation plus faible. En effet, nombre de ces stations seront probablement dans l'incapacité de financer durablement des installations d'enneigement artificiel¹⁸.

Bien plus conservatrice, l'étude Ecoplan/Sigmaplan [31] pronostique un coût des changements climatiques de l'ordre de 120 mio. CHF en 2050 (valeur médiane) pour le secteur du tourisme. Par rapport à l'étude de Meier, la différence au niveau des coûts estimés provient notamment de choix méthodologiques différents. Sur ce point, la différence la plus notable est l'abandon par Ecoplan/Sigmaplan d'une approche en équilibre partiel pour une approche en équilibre général à travers l'utilisation d'un modèle d'équilibre général calculable multi-régional. Il y a un avantage

17. En ce qui concerne le tourisme estival, on notera également qu'il génère, à l'heure actuelle, moins de revenus par jour et par personne que le tourisme d'hiver. Une étude menée en Valais sur la valeur ajoutée du tourisme [86] attribue principalement ce fait à une plus grande dépense, durant la saison d'hiver, pour les services offerts par les sociétés de remontées mécaniques.

18. Afin de pouvoir profiter des périodes relativement courtes et peu fréquentes de froid durant lesquelles elles peuvent produire de la neige, ces stations devront de plus investir d'une manière intensive, par exemple dans un lac de retenue et/ou dans des installations fixes le long des pistes, ceci dans le but de mobiliser de grandes quantités d'eau rapidement et de ne pas perdre du temps à déplacer leurs canons à neige.

certain à utiliser ce type de modèles afin d'évaluer les conséquences économiques des changements climatiques. Par exemple, les effets économiques de ces changements sur le secteur touristique ne sauraient être cloisonnés à ce seul secteur, affectant le reste de l'économie à travers divers canaux comme les revenus des ménages, les prix des facteurs de production, etc. Enfin, l'utilisation d'un modèle CGE comportant plusieurs régions permet aussi de tenir compte d'un effet différencié des changements climatiques sur des régions touristiques concurrentes. C'est particulièrement utile et pertinent pour le tourisme d'hiver où l'offre pour les différents pays de l'arc alpin va être différemment affectée par les changements climatiques (cf. [10]).

5.3 L'adaptation aux changements climatiques dans le tourisme alpin d'hiver

5.3.1 Les mesures d'adaptation envisageables

La sous-section précédente a montré, chiffres à l'appui, que le tourisme alpin d'hiver sera le segment touristique le plus touché par les changements climatiques en Suisse. Ces derniers auront de nombreux effets sur ce segment dont le plus important sera la baisse de l'enneigement naturel. Pour contrer cet impact, des mesures d'adaptation sont envisageables tant du point de vue de l'offre que de la demande. Du côté des exploitants de domaines skiables, on peut distinguer les mesures "techniques" des mesures "managériales". Les premières incluent principalement les investissements dans des installations d'enneigement artificiel, les investissements dans la modernisation des installations de transport¹⁹, l'amélioration de la préparation et de la maintenance des pistes de ski²⁰ ainsi que l'extension du domaine skiable en altitude ou sur les versants nord des montagnes. Les secondes incluent par exemple toutes les stratégies visant à diversifier les revenus et/ou à les accroître en dehors de la saison d'hiver. Le tableau 8 présente un certain nombre de mesures d'adaptation envisageables du côté de l'offre en les distinguant selon leur nature endogène ou exogène. Il indique également lesquelles de ces mesures ont été prises en compte dans notre analyse.

19. Il s'agit du remplacement des téléskis par des installations de transport, tels que les télésièges ou télécabines, qui n'ont pas besoin d'une couche de neige sur le sol afin de transporter les skieurs en altitude.

20. Au cours de ces dernières décennies, des progrès très importants ont déjà été accomplis dans la préparation et la maintenance des pistes permettant de pratiquer le ski avec des hauteurs de neige en constante diminution.

Tableau 8 – Mesures d’adaptation envisageables côté offre face à la baisse de l’enneigement naturel. (Source: adapté de [91])

Adaptation - côté offre	Endogène	Exogène	GEMINI-E3
Enneigement artificiel	X		X
Amélioration de la préparation/maintenance des pistes	X		X
Extension/Fermeture de domaines skiables	X		
Modernisation des installations de transport	X		X
Diversification de l’offre touristique	X		
Assurances et dérivés climatiques	X		
Subventionnement des investissements/coûts		X	X
Améliorer les prévisions météorologiques		X	

Nous renvoyons le lecteur à la sous-section 5.5 pour connaître la manière dont certaines de ces mesures d’adaptation ont été modélisées. Nous noterons simplement ici qu’un effort tout particulier a été apporté pour modéliser la production de neige artificielle. Les informations récoltées afin de mener à bien ce travail de modélisation sont décrites ci-dessous dans la sous-section 5.3.2. Du côté de la demande, les mesures envisageables d’adaptation sont présentées dans le tableau 9.

Tableau 9 – Mesures d’adaptation envisageables côté demande face à la baisse de l’enneigement naturel. (Source: adapté de [91])

Adaptation - côté demande	Endogène	Exogène	GEMINI-E3
Adapter les périodes de ski durant la saison	X		X
Changer de destination pour skier	X		X
Se tourner vers d’autres activités de loisirs	X		X
Améliorer les prévisions météorologiques		X	
Améliorer l’exactitude des bulletins météo/d’enneigement		X	

X = Adaptation prise en compte dans une variante de calcul de la baisse de la ressource en neige (cf. sous-section 9.6.1)

Trois parmi les cinq mesures d’adaptation du tableau 9 concernent directement les consommateurs (skieurs ou snowboarders). Ces mesures-là sont endogènes par nature. Elles représentent la possibilité pour les skieurs de modifier les périodes durant lesquelles ils vont skier, d’opter pour une destination de ski avec des conditions d’enneigement plus sûres (en Suisse ou à l’étranger) ou encore d’abandonner simplement la pratique du ski en lui préférant d’autres activités de loisirs. Toutes les trois ont été modélisées dans le présent travail. Nous renvoyons le lecteur à la sous-section 6.2 pour prendre connaissance de la manière dont les consommateurs arbitrent entre différents types de biens touristiques et non touristiques.

5.3.2 L'enneigement artificiel

En Suisse, l'usage de la neige artificielle s'est réellement développé à partir du début des années 90. Les premières aides aux investissements accordées par le biais de la LIM (Loi sur l'aide aux Investissements dans les régions de Montagne) pour des projets d'enneigement artificiel sont apparues au milieu des années 90 [46]. Dans le tableau 10, nous présentons l'évolution de ces investissements par grandes régions de ski (en termes de kilomètres de pistes pouvant être enneigés avec de la neige artificielle) entre 2001 et 2005:

Tableau 10 – Longueur de pistes de ski (en km) pouvant être enneigées artificiellement dans différentes régions en 2001 et 2005. (Source: [105, 106], Organisations faîtières des remontées mécaniques bernoises et grisonnes)

	Km de pistes	km de pistes enneigées (% de pistes enneigées)	
		2001	2005
Grisons	1 900	170 (8.9%)	340 (17.9%)
Oberland bernois	850	90 (10.6%)	180 (21.2%)
Valais	2 000	400 (20.0%)	520 (26.0%)
Autres régions	1 200	80 (6.7%)	150 (12.5%)
Total Suisse	5 950	740 (12.4%)	1190 (20.0%)

En 2008, 33% de la surface totale des pistes de ski préparées pouvaient être enneigées artificiellement en Suisse [90]. Ce taux de couverture impliquait une utilisation déjà intensive de ressources. A l'avenir, les changements climatiques contribueront aussi à augmenter le recours à la neige artificielle. Toutefois, il est possible que l'accès à l'eau constitue, dans certaines régions où l'eau est rare ou bien employée à de nombreuses fins, un facteur limitant au développement de l'enneigement artificiel. Différentes sources nous permettent d'appréhender quels sont les coûts liés à la production de neige artificielle. Par exemple, une étude a estimé le coût moyen de produire 1 m^3 de neige dans les stations de sports d'hiver françaises.

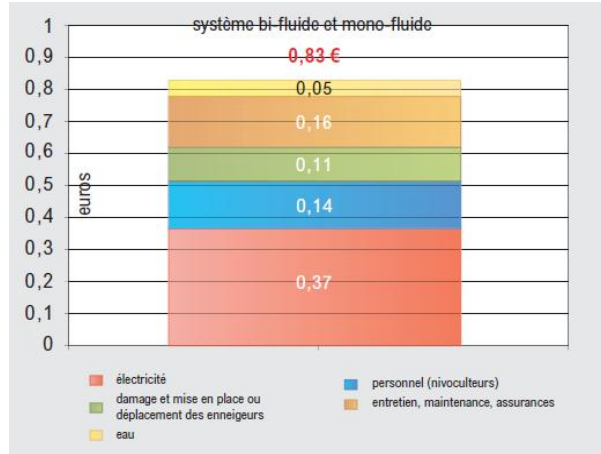


Figure 8 – Coût moyen du m^3 de neige produite (saison 2007/2008). (Source: [1])

Basée sur un échantillon d’une trentaine de sociétés de remontées mécaniques suisses, une seconde étude a dérivé les coûts annuels moyens de l’enneigement artificiel pour différents postes tels que la consommation d’électricité, la consommation d’eau et les charges de personnel. Les résultats sont présentés dans le tableau 11.

Tableau 11 – Structure des coûts annuels moyens de l’enneigement artificiel en Suisse pour trois classes de sociétés de remontées mécaniques (saison 2007/2008). (Source: [16])

	Chiffre d'affaires (CA) des sociétés de remontées mécaniques		
	$CA < 5Mio$	$5Mio \leq CA < 10Mio$	$CA \geq 10Mio$
Coûts de l'électricité	48 833 (35.7%)	99 890 (40.6%)	203 600 (20.4%)
Coûts de l'eau	9 857 (7.2%)	15 182 (6.2%)	45 650 (4.6%)
Charges de personnel	40 000 (29.2%)	63 909 (26%)	276 500 (27.7%)
Autres charges	38 167 (27.9%)	66 800 (27.2%)	471 500 (47.3%)
Coût total	136 857 (100%)	245 781 (100%)	997 250 (100%)

On peut constater que la structure des coûts change selon la taille des entreprises. Parmi les entreprises de petite et moyenne taille, les dépenses pour l’achat de l’électricité sont supérieures aux charges de personnels ainsi qu’aux coûts du capital (qui sont inclus dans le poste “Autres charges”). La situation n’est pas la même pour les grandes entreprises où la part des dépenses pour l’électricité est nettement plus faible. Ces sociétés couvrent avec leurs installations d’enneigement artificiel une surface en moyenne plus grande que les petites et moyennes entreprises. Elles disposent aussi d’infrastructures relativement neuves et performantes et sont donc plus intensives en capital. Par kilomètre de pistes enneigées, leur investissement moyen est d’environ 825 000 CHF contre environ 475 000 CHF pour les entreprises de petite et moyenne taille²¹. Ces

21. Pour l’ensemble de l’échantillon, c’est une valeur d’environ 600 000 CHF qui a été trouvée. On peut

deux raisons expliquent sans doute le haut niveau du coût moyen du capital pour ces entreprises. Avec une part située entre 25 et 30% des dépenses totales, les charges de personnel sont en revanche stables parmi les trois différentes classes d'entreprises. Le poste des dépenses en eau est clairement le moins important et représente toujours moins de 10% des dépenses totales. Enfin, les valeurs indicatives des coûts annuels d'exploitation par kilomètre de pistes enneigées artificiellement nous sont fournies par une troisième étude [42]. Ces valeurs sont les suivantes:

- Fr. 50 000.- à 75 000.-/km
- Fr. 100 000.- à 120 000.-/km (intérêts et amortissements compris)

5.4 Le marché mondial du ski²²

Il n'y a évidemment pas qu'en Suisse où le ski est pratiqué. Dans le monde, on dénombre environ 80 pays où il est pratiqué en plein air ou dans des installations intérieures. Toutefois, nombre de ces pays ne sont que des acteurs secondaires sur le marché mondial du ski. Les acteurs les plus importants sont les USA, le Canada, les pays de l'arc alpin (Autriche, France, Italie, Suisse) ainsi que le Japon. Le graphique 9 permet de visualiser l'évolution de la fréquentation des skieurs en termes de journées-skieurs dans cinq grandes régions (cf. la sous-section 6.1) au cours de la dernière décennie:²³

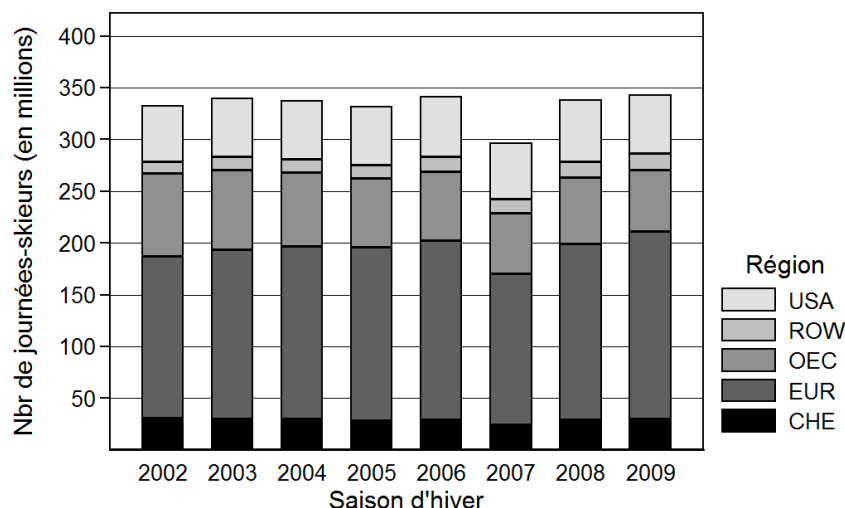


Figure 9 – Evolution des journées-skieurs pour cinq régions du modèle. (Source: Laurent Vanat)

Comme il fallait s'y attendre, les régions avec les plus fortes fréquentations sont les régions EUR et OEC parce que chacune d'entre elles comprend plusieurs acteurs majeurs de la branche. Les

donc estimer qu'il en coûte en moyenne 600 000 CHF d'investissement aux entreprises suisses de remontées mécaniques pour enneiger un kilomètre de piste. Cette valeur est plus faible que celle communément admise dans la littérature de 1 mio CHF par km. Quoi qu'il en soit, on comprendra aisément qu'investir dans l'enneigement artificiel n'est pas une mesure d'adaptation à la portée de tous les domaines skiables.

22. Toutes les informations de cette sous-section sont tirées de [101].

23. Nous avons construit le graphique 9 sur la base des données recueillies par Laurent Vanat sur la consommation de ski (le nombre de journées-skieurs) dans 18 pays. Ces données n'étant pas exhaustives, le nombre de journées-skieurs pour les régions EUR et ROW est sous-estimé. De plus, ces données ne couvrent pas la région BRI.

régions USA et CHE viennent ensuite. Durant les années 2000, le nombre total de journées-skieurs est resté assez stable. La baisse observée en 2007 a pour origine le manque de neige en Europe lors de la saison d’hiver 2006/07 comme l’indique la contraction du nombre de journées-skieurs en Suisse et surtout dans la zone EUR²⁴. Ceci étant dit, la part de marché détenue par cette dernière augmente sur la décennie grâce au dynamisme des marchés français et autrichiens. A l’inverse, la part de marché de la zone OEC baisse du fait d’un recul de la pratique du ski au Japon. A l’avenir, le poids de l’Asie devrait augmenter grâce à l’émergence des marchés sud-coréen, chinois, indien ou encore pakistanais.

Le tableau 62 de l’annexe E.1 détaille et complète les informations données ci-dessus en décrivant notamment quelques caractéristiques de l’offre pour 25 pays. Au niveau des pays, le trio de tête est constitué de la France, de l’Autriche et des USA tant en ce qui concerne le nombre de remontées mécaniques que la fréquentation des domaines par les skieurs. Cette dernière dépasse les 50 millions de journées-skieurs dans les trois pays. En revanche, l’importance de la clientèle étrangère les distingue assez nettement puisqu’elle représente deux tiers des journées-skieurs en Autriche, environ un quart des journées-skieurs en France et moins de 10% des journées-skieurs aux USA. A noter également que les marchés autrichien et français continuent de croître significativement au niveau de la fréquentation ce qui n’est plus le cas du marché américain.

5.5 Représentation du tourisme dans GEMINI-E3

Initialement, le tourisme n’était pas inclus dans le modèle GEMINI-E3. Plutôt que d’ajouter un secteur touristique qui aurait englobé toutes les formes de tourisme, nous avons décidé d’ajouter au modèle les trois segments touristiques suivants : “(snow-dependent) winter overnight tourism”, “(snow-dependent) one-day winter tourism” et “other forms of tourism”. Le premier de ces segments représente le tourisme alpin d’hiver dont la production est destinée aux visiteurs-skieurs générant une ou plusieurs nuitées. Nous utiliserons le terme de “skieur-touriste” pour désigner cette clientèle touristique. Le second segment touristique complète le premier puisqu’il représente la partie du tourisme alpin d’hiver dont la production est destinée aux visiteurs-skieurs ne générant aucune nuitée. Nous utiliserons le terme de “skieur-excursionniste” pour désigner cette clientèle touristique. Enfin, le dernier segment englobe le solde des activités touristiques ce qui en fait un segment touristique conséquent. De ce fait, il inclut les tourisms “rural” et “urbain” de même que le tourisme “alpin” durant la période estivale.

Le choix de ces segments s’est fait en fonction de la connaissance des impacts des changements climatiques, des options envisageables d’adaptation ainsi que des possibilités de substitution entre les différentes formes de tourisme. Nous avons souhaité dissocier “(snow-dependent) winter overnight tourism” et “(snow-dependent) one-day winter tourism” du fait que leur vulnérabilité aux changements climatiques n’est pas la même (cf. sous-sections 5.2 et 5.3). De surcroît, nous faisons l’hypothèse que les “biens” produits par ces deux secteurs sont substituables dans la fonction d’utilité du consommateur et qu’ils peuvent être combinés de telle manière à créer un bien composite relatif aux sports de neige. Qualitativement, nos hypothèses concernant les possibilités pour le consommateur de substituer un type de tourisme pour un autre sont faciles à visualiser à l’aide de l’arborescence de la figure 20 à la page 66. Les hypothèses quantitatives concernant les élasticités de substitution sont données à la suite de la figure, au tableau 14. L’arborescence

24. Il est intéressant de noter que les autres régions ne semblent pas avoir profité de ces mauvaises conditions d’enneigement en Europe. Cela reflète le cloisonnement actuel des marchés du ski nord-américain, asiatique et européen.

nous permet également de visualiser deux autres points importants. Le premier a trait au fait qu’un consommateur peut choisir de consommer un bien touristique produit dans n’importe laquelle des six régions incluses dans le modèle. Le secteur “(snow-dependent) one-day winter tourism” fait toutefois exception. De par sa nature, la consommation par des résidents étrangers, y compris par ceux provenant des pays limitrophes, ne représente qu’une part économiquement négligeable de l’ensemble de sa production. L’autre point à noter est que la consommation de tourisme se résout, à sa ramification la plus extrême, à combiner un service de transport avec un panier d’autres biens et services. Cette spécification du modèle est avantageuse puisqu’elle nous permettrait en théorie de prendre en compte l’impact d’une variation des prix de transport sur les comportements de voyages du consommateur. Une telle variation, notamment à la hausse, peut être liée à des facteurs, tels que les politiques climatique ou énergétique, dont la prise en compte est d’un intérêt direct pour le projet.

La structure de la fonction de production pour les deux segments de sports d’hiver est telle que celle présentée à la figure 10. Cette arborescence nous permet de bien visualiser nos hypothèses en termes de possibilités de substitution et donc d’adaptation. Le secteur réagit à la baisse de l’enneigement naturel en deux étapes. D’abord, il a la possibilité de compenser cette baisse en produisant plus de neige artificielle. L’arborescence reflète ce que nous avons montré à la sous-section 5.3, à savoir que les inputs “capital”, “électricité”, “eau” et “travail” sont utilisés pour produire cette neige artificielle. L’eau utilisée est prélevée pour la plus grande partie directement dans la nature même si le secteur peut aussi utiliser de l’eau potable. Ensuite, le secteur a la possibilité de substituer d’autres facteurs dont du capital au bien composite “neige”. Ce mécanisme représente la capacité du secteur à s’adapter à travers des investissements visant à exploiter le domaine skiable avec toujours moins de neige. Concrètement, ces investissements correspondent à deux mesures d’adaptation présentées au tableau 8. Il s’agit des mesures ayant pour but l’amélioration de la préparation et de la maintenance des pistes ainsi que la modernisation des installations de transport.

Tableau 12 – Elasticités de substitution employées dans la fonction de production des segments du tourisme d’hiver

Elasticities of substitution		
Snow and other factors	σ	0.1
Natural and artificial snow (overnight)	σ_s	0.9
Natural and artificial snow (one-day)	σ_s	0.45
Among inputs used to produce artificial snow	σ_{as}	0.3
Raw and drinking water	σ_w	0.5

En les intégrant à la structure de production des segments de sports d’hiver, nous faisons l’hypothèse centrale que les mesures d’adaptation susmentionnées seront au moins envisageables ou disponibles jusqu’à l’horizon 2050. Cela veut par exemple dire que ces segments touristiques pourront toujours produire de la neige artificielle en 2050 s’ils le désirent. Toutefois, cela ne veut pas dire que le recours à la neige artificielle ne fera l’objet d’aucunes contraintes. Un de nos scénarios simulera par exemple une hausse du prix de la neige artificielle induite par le réchauffement climatique.

Enfin, la structure de production ainsi élaborée nous permet de modéliser la plus forte vulnérabilité aux changements climatiques du secteur “(snow-dependent) one-day winter tourism” comparée à la vulnérabilité du secteur “(snow-dependent) winter overnight tourism”. Cette plus grande

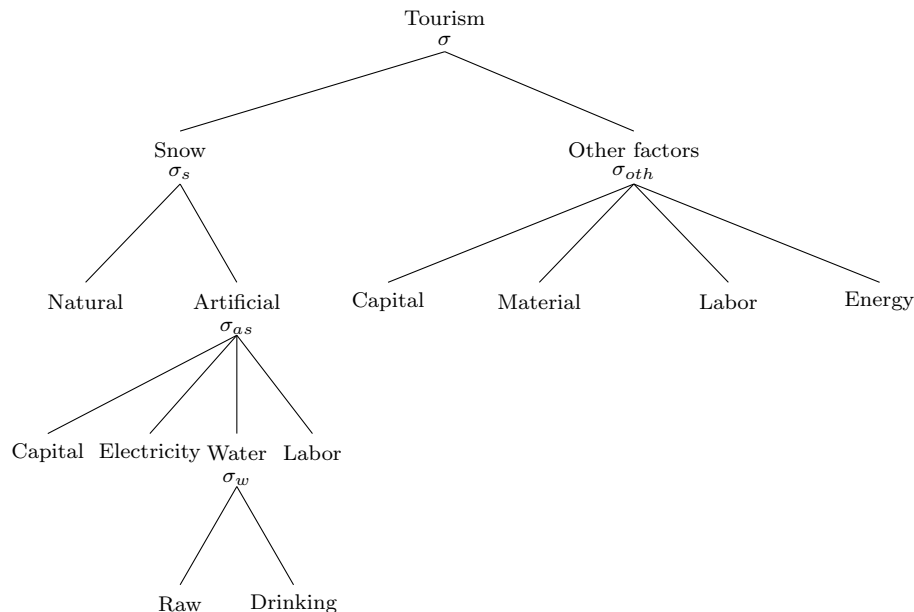


Figure 10 – Arborescence employée pour les deux segments touristiques liés à la pratique des sports d’hiver.

vulnérabilité se traduit de deux manières: à travers une plus forte baisse du facteur “neige” ainsi qu’à travers une plus faible élasticité de substitution entre la neige naturelle et la neige artificielle (cf. tableau 12). Ce dernier point intègre le fait que les conditions pour produire de la neige artificielle (et la conserver) sont moins bonnes dans les domaines de basse et moyenne altitude où les périodes de froid sont moins fréquentes et moins longues.

5.6 Calibration des segments touristiques

Afin de calibrer les équations liées aux nouveaux segments touristiques, un effort conséquent en termes de données a dû être consenti. Rappelons ici que le tourisme, en tant que secteur, n’existe ni dans la base de données du GTAP ni dans la matrice Input-Output de la Suisse (SIOT). Il s’agit d’une différence fondamentale par rapport aux autres secteurs abordés dans ce travail qui justifie la description, donnée ci-dessous, des différentes sources de données utilisées pour la calibration des segments touristiques. Formellement, la consommation de tourisme correspond aux biens et services consommés par les ménages lors de leurs voyages et/ou excursions hors de leur environnement habituel²⁵. Pour chacun des segments touristiques que nous avons défini, il a donc fallu déterminer quels étaient les biens et les services consommés et en quelles quantités ils l’avaient été durant la période de référence. Pour ce faire, les sources suivantes d’information ont été utilisées:

- Le compte satellite du tourisme de la Suisse ;
- La balance touristique de la Suisse ;
- Etudes régionales sur la valeur ajoutée du tourisme ;
- Autres sources ;

Nous commencerons par décrire succinctement les plus importantes d’entre elles à la section 5.6.1 avant de présenter les résultats auxquels nous sommes parvenus à la section 5.6.2. Les informa-

25. Lire ci-dessus la définition du tourisme donnée à la sous-section 5.1.

tions nécessaires pour calibrer la production de neige artificielle ont déjà été données aux sous-sections 5.3.2 et 2.4.3 (cette dernière pour l'extraction de l'eau brute). Quant à la neige naturelle, il a également fallu l'estimer puisqu'elle est considérée comme un facteur de production à part entière. Nous présenterons la manière dont nous nous y sommes pris à la sous-section 5.6.3.

5.6.1 Sources utilisées pour créer le secteur du tourisme

Le compte satellite du tourisme de la Suisse, 2001 et 2005

Dans le cadre de notre projet, le compte satellite du tourisme [12] (ci-après abrégé par CST) nous fournit deux types d'informations essentielles. D'abord, ce document nous renseigne sur les secteurs à prendre en compte pour construire ceux du tourisme puisqu'il identifie clairement les biens et services consommés dans le cadre d'excursions ou de séjours touristiques. Ensuite, il donne le montant des dépenses touristiques pour chacun de ceux-ci. La figure 11, tirée du CST, présente ainsi les valeurs agrégées des dépenses touristiques pour différents biens et services en 2001 et 2005 :

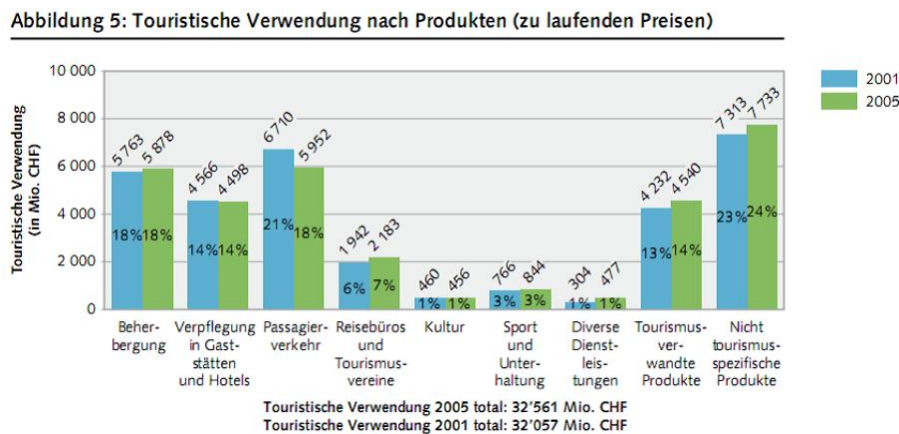


Figure 11 – Consommation liée au tourisme pour différents biens et services. (Source: [12])

L'information sur les dépenses est d'autant plus utile qu'elles sont ventilées selon différents critères tels que la provenance du visiteur (résident suisse versus résident étranger), la durée du voyage (avec ou sans nuitée(s)) ou encore le motif du voyage (privé versus professionnel). En tout, le CST différencie cinq types de visiteurs dont les dépenses touristiques agrégées sont présentées à la figure 12.

La balance touristique de la Suisse

Comme son nom l'indique, la balance touristique de la Suisse compare les dépenses touristiques des résidents suisses à l'étranger (dépenses du tourisme "émetteur") avec les dépenses touristiques des résidents étrangers en Suisse (recettes du tourisme "récepteur"). En principe, le CST ne couvre pas le tourisme "émetteur"²⁶. Dès lors, les informations de la balance touristique

26. Toutefois, la partie des recettes générées par le tourisme émetteur en Suisse fait exception (par ex: les vols réservés auprès des compagnies aériennes suisses et les assurances-voyage conclues auprès de sociétés d'assurance suisses).

Abbildung 4: Direkte touristische Nachfrage nach Besuchertypen (zu laufenden Preisen)

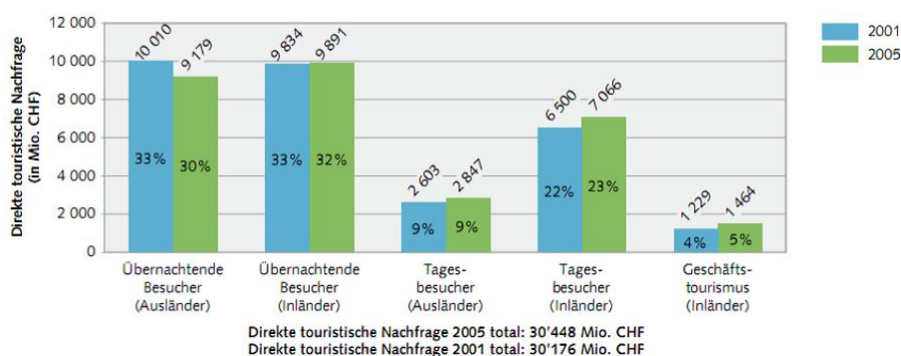


Figure 12 – Consommation liée au tourisme par type de visiteurs. (Source: [12])

sur les dépenses des résidents suisses à l'étranger fournissent un complément aux informations disponibles dans le CST. Malheureusement, ces informations sont très agrégées. Toutefois, elles permettent de distinguer les dépenses des voyages à l'étranger avec nuitée(s) des dépenses des voyages à l'étranger sans nuitée. Les montants de ces dépenses pour les années 2001 et 2005 sont présentés dans le tableau 13.

Tableau 13 – Dépenses touristiques des Suisses à l'étranger. (Source: La balance touristique de la Suisse, OFS.)

	Dépenses à l'étranger (en Mio. de CHF)	
	2001	2005
Séjours avec nuitées	6 519	8 282
Excursions d'un jour et tourisme de transit & autres services touristiques	2 154	2 673
Dépenses de consommation des frontaliers ¹	19	21
Total	8 691	10 975

¹ Depuis 2003, y compris les dépenses de consommation des personnes au bénéfice d'un permis de séjour de courte durée (moins de 4 mois).

Etudes régionales sur la valeur ajoutée du tourisme

Afin de calculer les recettes touristiques générées dans une région, certaines études sur la valeur ajoutée du tourisme déterminent, à l'aide d'un questionnaire, les dépenses moyennes par jour et par visiteur de différents types d'hôtes. Ces études distinguent les hôtes qui séjournent des hôtes qui ne font qu'une excursion sans nuitée. Une autre distinction communément faite est celle entre hôtes de la saison d'été et hôtes de la saison d'hiver. Dans certains cas, des informations sur les différentes catégories de dépenses sont aussi disponibles. Ces dernières informations nous intéressent tout particulièrement et celles provenant de trois études sont présentées dans le tableau 63 de l'annexe E.2. Ce tableau permet de se représenter quelles sont les dépenses principales d'un skieur venant à la journée ou séjournant en station (hors frais de déplacement pour le voyage aller-retour). Le principal poste de dépenses est constitué par les dépenses dans l'hébergement et la restauration puisqu'elles constituent entre 50 et 60% des dépenses pour les touristes et plus

de 40% des dépenses des excursionnistes. La différence notable entre touristes et excursionnistes provient bien-sûr de l'absence de dépenses d'hébergement pour ces derniers. Un second poste important de dépenses est constitué par les dépenses dans les remontées mécaniques. Ce poste représente entre 30 et 40% des dépenses des excursionnistes mais seulement à peu près 10% des dépenses des touristes. Les dépenses profitant au commerce de détail sont aussi importantes, de l'ordre de 15% pour les touristes. Elles sont plus variables pour les excursionnistes avec une part aux dépenses totales journalières se situant dans un intervalle de 10 à 20%. Si on les cumule, les dépenses dans la restauration, l'hébergement, le commerce de détail et les remontées mécaniques comptent pour 80 à 95% de l'ensemble des dépenses des visiteurs.

Comme on peut le voir à la figure 20 de la page 66, les dépenses de transport engendrées pour se rendre vers le lieu de l'excursion ou des vacances sont traitées d'une manière séparée des dépenses effectuées durant le séjour ou l'excursion. Ces dépenses de transport représentent souvent une part importante des coûts totaux d'un voyage. Toutefois, il existe une différence notable entre les touristes et les excursionnistes puisque la part des dépenses de transport dans la dépense journalière moyenne est d'environ 20% pour les premiers et de presque 50% pour les seconds (cf. [85], [86]). La calibration du modèle requiert que ces dépenses de transport soient ventilées en fonction des types de transport utilisés. Là aussi, les études régionales sur la valeur ajoutée du tourisme nous renseignent car elles se sont aussi penchées sur les modes de transport utilisés par les visiteurs pour arriver sur leurs lieux de séjour ou d'excursion. Ces études mettent d'abord en lumière le rôle central de la voiture pour les excursionnistes. Dans les Alpes vaudoises, 80% des excursionnistes de l'été 2002 et de la saison d'hiver 2002/03 utilisaient ainsi un véhicule privé ou loué comme unique moyen de transport pour atteindre leur destination. En outre, ce moyen de transport a été utilisé par 84% des excursionnistes de l'Oberland bernois durant la saison d'hiver 1993/94 et par 69% des excursionnistes du canton du Valais durant la saison d'hiver 1999/2000²⁷. L'utilisation du train arrive en seconde position (11% resp. 32% des excursionnistes de l'Oberland bernois et du canton du Valais). Dans les Alpes vaudoises, 15% des excursionnistes ont utilisé uniquement les transports publics pour leur voyage aller-retour (chemin de fer, bus, car postal). Au niveau des hôtes hébergés, il existe une différence notable entre les clients des hôtels et les personnes séjournant dans des appartements ou chalets de vacances. Ces derniers utilisent beaucoup plus leur voiture que les premiers (81% vs 65% dans les Alpes vaudoises, 92% vs 73% dans l'Oberland bernois et 83% vs 63% dans le canton du Valais). Les transports publics de même que l'avion jouent un rôle plus important pour les clients d'hôtels que pour les personnes logeant dans des appartements et chalets de vacances.

Autres sources

D'autres sources d'information que nous ne détaillerons pas dans ce rapport ont également été utilisées:

- la *statistique des transports publics (téléphériques)* de l'Office fédéral de la statistique (OFS).
- la *statistique de l'hébergement touristique* de l'OFS.
- la *statistique suisse du nombre de journées-skieurs* de Laurent Vanat²⁸.

27. Dans ces deux cas, il n'est pas exclu que l'usage de la voiture ait été combiné avec un autre moyen de transport pour atteindre le lieu de l'excursion.

28. Le nombre de journées-skieurs est une mesure de la fréquentation d'une station de ski. Une journée-skieur correspond à la visite journalière d'une personne venant pratiquer un sport de glisse tel que du ski ou du snowboard sur un domaine skiable.

- l'enquête sur les comportements de voyage de la population suisse de l'université de St-Gall (année 2001)²⁹.
- l'enquête de l'OFS sur le comportement en matière de voyages de la population résidente suisse, en 2003 (cf. [36]).

A toutes ces sources d'information recueillies pour la Suisse s'ajoutent aussi celles utilisées pour construire le secteur du tourisme dans les autres régions du modèle. Une partie de cette information a déjà été présentée dans la sous-section décrivant le marché mondial du ski. Pour le reste, nous avons utilisé les valeurs fournies par les différentes agences statistiques nationales dont un assez grand nombre ont construit et publié un compte satellite du tourisme³⁰. Enfin, les publications d'eurostat ([34], [35]) et de l'OCDE sur les politiques et tendances du tourisme ([76]) nous ont aussi été d'une aide précieuse.

5.6.2 Description des trois segments touristiques en 2001

Sur la base des informations décrites ci-dessus, nous avons pu construire le secteur suisse du tourisme pour l'année 2001 tout en le différenciant en trois segments comme il est présenté aux figures 13 et 14.

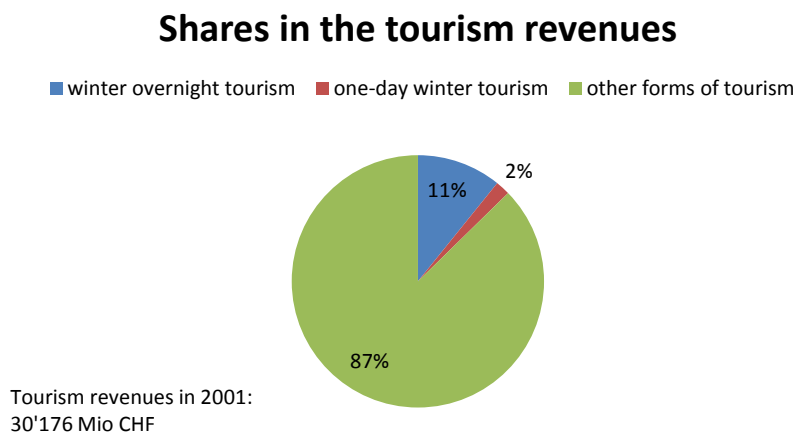


Figure 13 – Part des trois segments au total des revenus touristiques en 2001.

29. En réalité, nous avons utilisé les résultats d'une analyse basée sur cette enquête (cf. [62]).

30. Les références de deux de ces publications ont été ajoutées à la bibliographie. Il s'agit des comptes satellites du tourisme qui ont été construits pour les USA [50] et le Canada [96].

Employment shares

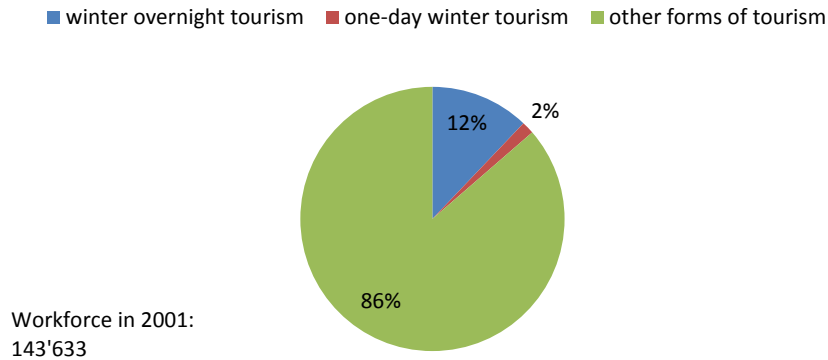


Figure 14 – Part des trois segments au total des emplois touristiques en 2001 (équivalents plein temps).

Les segments touristiques d'hiver qui dépendent de la neige ne constituaient en 2001 qu'une part relativement modeste de l'ensemble du secteur touristique puisqu'ils représentaient 13% des recettes touristiques et 14% des emplois exprimés en équivalents plein temps. Cela peut surprendre mais s'explique par le fait que notre définition du tourisme, qui est celle utilisée dans le compte satellite du tourisme de la Suisse, est très large. Outre la taille, chaque segment se différencie également du point de vue des produits consommés. Les trois figures suivantes permettent de bien comprendre les différences au niveau de la nature des trois segments touristiques considérés.

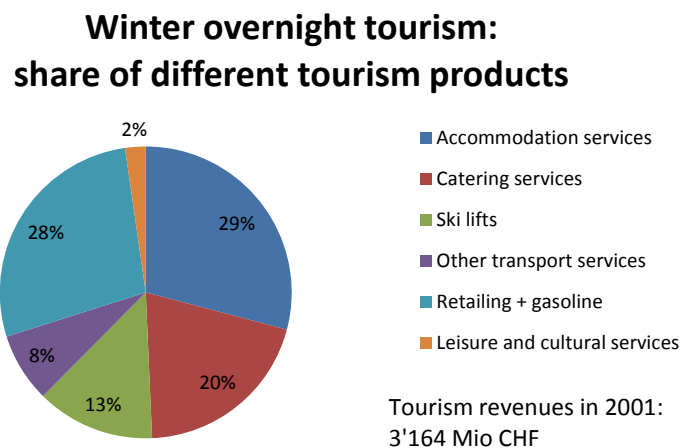


Figure 15 – Part des produits touristiques consommés dans le secteur “winter overnight tourism”.

One-day Winter Tourism: share of different tourism products

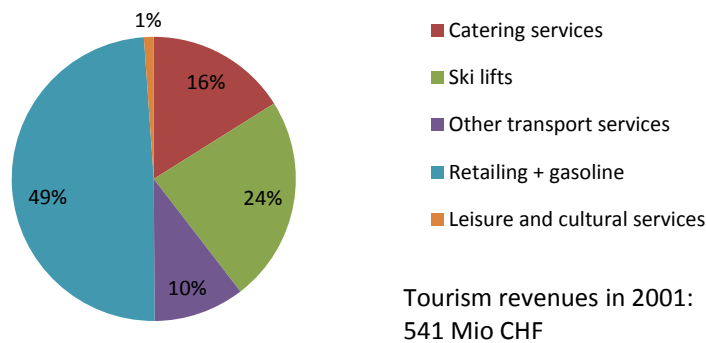


Figure 16 – Part des produits touristiques consommés dans le secteur “one-day winter tourism”.

Other forms of tourism: share of different tourism products

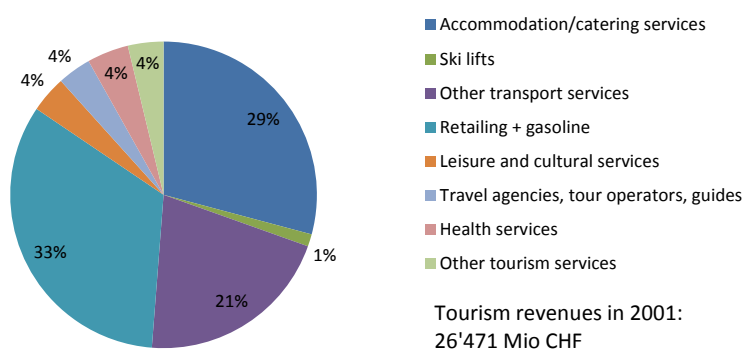


Figure 17 – Part des produits touristiques consommés dans le secteur “other forms of tourism”.

Entre les deux segments de sports d’hiver, les divergences les plus notables concernent l’hébergement, la part des dépenses pour le voyage aller-retour ainsi que les dépenses pour les remontées mécaniques. Le segment “one-day winter tourism” n’inclut aucun service d’hébergement. En revanche, les dépenses pour les remontées mécaniques ainsi que pour le voyage aller-retour constituent une part importante de la consommation des “skieurs-excursionnistes”. Etant donné que ceux-ci se déplacent principalement en voiture, l’importance des dépenses pour le voyage aller-retour se manifeste par la part de presque 50% du produit “Commerce de détail+essence” aux recettes totales du segment “one-day winter tourism”.

5.6.3 Rémunération de la neige naturelle

Cette partie du rapport présente la manière dont nous avons donné une valeur monétaire à la neige naturelle dont bénéficie le tourisme d’hiver en Suisse. Une approche économétrique a été choisie afin d’analyser la sensibilité du tourisme alpin d’hiver aux conditions d’enneigement, l’idée étant d’analyser le lien qui existe entre ces dernières et un “outcome” d’ordre économique comme la fréquentation des domaines skiables ou des hôtels³¹. Pour ce faire, nous avons récolté et compilé un nombre important de données sur une centaine de domaines skiables suisses durant les saisons d’hiver 2005/06 à 2008/09. Toutes les variables qui ont été mesurées sur les domaines skiables eux-même (hauteurs de neige, conditions météorologiques, kilomètres de pistes avec de la neige artificielle) nous ont été fournies par Suisse Tourisme alors que les données sur les nuitées proviennent de l’OFS et celles sur les journées-skieurs de Laurent Vanat. Nous avons transformé les données sur les hauteurs de neige afin d’obtenir le nombre de jours par saison d’hiver avec un enneigement suffisant pour la pratique du ski³². Quant aux variables sur les nuitées et les journées-skieurs, elles constituent les variables dépendantes de notre analyse, celles dont nous aimerions connaître le sens et l’ampleur de la variation lorsque les conditions d’enneigement varient (toutes choses étant égales par ailleurs). L’identification de cet effet est possible à condition de “contrôler” un certain nombre de facteurs qui influencent la fréquentation d’une station de ski et qui sont corrélés avec les conditions d’enneigement. C’est la raison pour laquelle nous avons estimé l’équation 1 qui permet justement de le faire pour toute une série d’effets fixes. Un certain nombre de variables observées sont aussi incluses dans le modèle (par ex: les capacités de transport et d’enneigement artificiel). Dans l’équation 1, elles sont représentées par le vecteur \mathbf{x}_{it} . Notre intérêt se porte sur l’estimation du coefficient β_2 . On notera finalement que les domaines skiables sont distingués par l’indice i alors que les périodes de temps (saisons d’hiver) le sont par l’indice t .

$$\ln(y_{it}) = \alpha_i + \beta_1 \cdot \mathbf{x}_{it} + \beta_2 \cdot SD_{it} + \delta_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

y_{it} : skier visits or hotel overnight stays

α_i : a ski area fixed effect

\mathbf{x}_{it} : a set of control variables

SD_{it} : the number of days with enough snow (“skiable days” at a specified altitude)

δ_t : a winter season fixed effect

ε_{it} : an error term

31. Cette approche a été détaillée et les résultats présentés dans [47].

32. Nous avons utilisés plusieurs seuils $\theta \in \{30, 50, 70cm\}$ afin de calculer ce nombre de jours. Le choix d’un seuil particulier est fonction de l’altitude à laquelle les hauteurs de neige ont été mesurées.

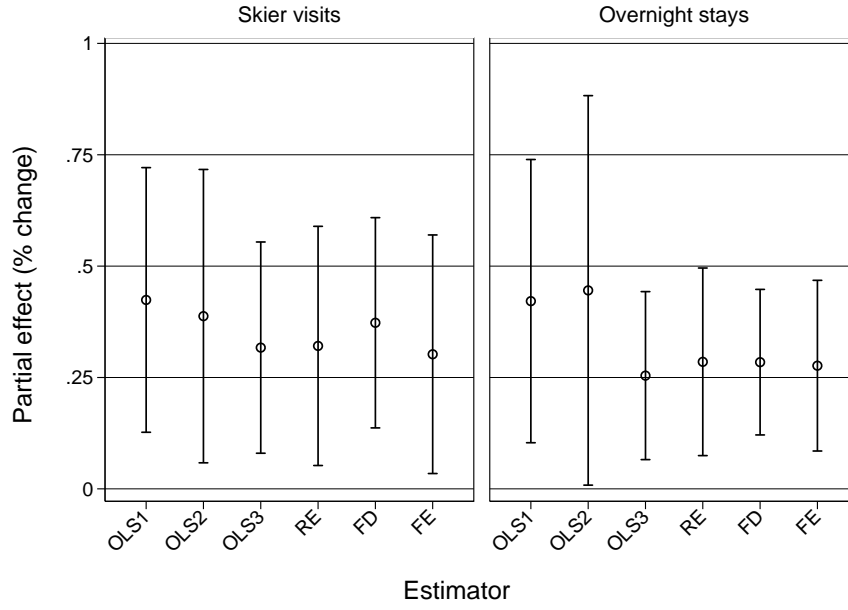


Figure 18 – Intervalles de confiance à 95% pour la sensibilité des journées-skieurs (figure de gauche) et celle des nuitées hôtelières (figure de droite) au nombre de jours avec un enneigement suffisant. Les estimateurs utilisés ont été les suivants: OLS=Ordinary Least Squares; RE=Random Effects; FD=First-Difference; FE=Fixed Effects.

Les valeurs estimées de β_2 ($= \hat{\beta}_2$) que nous avons obtenues avec différents estimateurs sont présentées à la figure 18 avec leur intervalle de confiance à 95%. Si on prend les résultats du “fixed effects estimator” (FE), nous estimons qu’un jour supplémentaire avec des conditions de neige suffisantes pour la pratique du ski génère une augmentation de 0.30% des journées-skieurs et de 0.28% des nuitées hôtelières. A partir de ces résultats, il est possible d’extrapoler au secteur des remontées mécaniques et à celui de l’hôtellerie le profit généré par une journée supplémentaire avec des conditions d’enneigement suffisantes pour la pratique du ski. Pour le secteur des remontées mécaniques, le calcul est le suivant:

$$\begin{aligned}
 P_{lifts,snow} &= \text{RATIO}_{lifts} \cdot (\hat{\beta}_2 \cdot SV \cdot PSV) \\
 P_{lifts,snow} &= 0.20 \cdot (0.0030 \cdot 30\,457\,761 \cdot 22.49) \\
 &= 513\,746
 \end{aligned} \tag{2}$$

Où:

$P_{lifts,snow}$: Profit from one “skiable day” for the ski lifts sector in CHF

RATIO_{lifts} : Earnings ratio of the ski lifts sector

SV : Overall number of skier visits in Switzerland during the 2000/01 winter season

PSV : Average transport revenue generated by one skier visit in CHF during the 2000/01 winter season

Pour la branche hôtelière, le profit est calculé d’une manière similaire:

$$\begin{aligned}
P_{hotel,snow} &= \text{RATIO}_{hotel} \cdot (\hat{\beta}_2 \cdot \text{ONS} \cdot \text{PONS}) \\
P_{hotel,snow} &= 0.05 \cdot (0.0028 \cdot 8\,855\,977 \cdot 108) \\
&= 133\,902
\end{aligned} \tag{3}$$

Où:

$P_{hotel,snow}$: Profit from one “skiable day” for the hotel industry in CHF

RATIO_{hotel} : Earnings ratio of the hotel industry in the mountain regions

ONS : Total number of hotel overnight stays in Swiss mountain regions during the 2000/01 winter season

PONS : Average cost of an overnight stay in CHF for the year 2001

Enfin, il reste à estimer, pour l’ensemble de la saison d’hiver, le profit généré grâce aux bonnes conditions d’enneigement pour nos deux segments touristiques liés aux sports d’hiver. Les deux formules suivantes permettent d’estimer ces valeurs. Commençons d’abord par le segment “one-day winter tourism”:

$$\begin{aligned}
V_{one-day,snow} &= \gamma_{one-day} \cdot \text{DAYS} \cdot P_{lifts,snow} \cdot \text{MULT}_{one-day} \\
V_{one-day,snow} &= 0.234 \cdot 100 \cdot 513\,746 \cdot 2 \\
&= 24\,043\,313
\end{aligned} \tag{4}$$

Où:

$V_{one-day,snow}$: Winter season profit from “skiable days” for the tourism segment “one-day winter tourism”

$\gamma_{one-day}$: Fraction of the winter transport revenues allocated to the tourism segment “one-day winter tourism”

DAYS : Average number of operating days in a winter season

$\text{MULT}_{one-day}$: Multiplicative factor for the tourism segment “one-day winter tourism” equal to the ratio total tourism expenditures to ski lifts expenditures

Nous trouvons le résultat suivant pour le segment “winter overnight tourism”:

$$\begin{aligned}
V_{overnight,snow} &= ((1 - \gamma_{one-day}) \cdot \text{DAYS} \cdot P_{lifts,snow} \\
&\quad + \text{DAYS} \cdot P_{hotel,snow}) \cdot \text{MULT}_{overnight} \\
V_{overnight,snow} &= ((1 - 0.234) \cdot 100 \cdot 513\,746 + 100 \cdot 133\,902) \cdot 1.9 \\
&= 100\,211\,973
\end{aligned} \tag{5}$$

Où:

$V_{overnight,snow}$: Winter season profit from “skiable days” for the tourism segment “winter overnight tourism”

$\text{MULT}_{overnight,snow}$: Multiplicative factor for the tourism segment “winter overnight tourism” equal to the ratio total tourism expenditures to ski lifts and hotel expenditures

6 Les autres modifications apportées au modèle

6.1 Le découpage géographique

Pour le projet, nous avons retenu un découpage compact concernant les régions du monde permettant de limiter les temps de calcul. La version de GEMINI-E3 que nous utilisons détaille 6 zones:

- La Suisse (CHE) ;
- Les pays de l’Union Européenne dans sa configuration à 25 membres (EUR) ;
- Les États-Unis (USA) ;
- Le Canada, le Japon, l’Australie et la Nouvelle-Zélande (OEC) ;
- Les pays émergents: Russie, Chine, Inde et Brésil (BRI) ;
- Le reste du Monde (ROW).

6.2 La fonction de consommation

La prise en compte d’une nomenclature de produits plus détaillée nous a conduit à remplacer la fonction de consommation standard basée sur une formulation de type Stone-Geary [97], par une arborescence de fonctions CES [11] plus flexible dans son utilisation. Les figures 19 et 20 décrivent la structure retenue. Nous supposons que les ménages arbitrent dans un premier temps entre cinq fonctions de dépenses liées au tourisme, au logement, au transport, à l’agriculture et aux autres consommations. Concernant les dépenses liées au transport et au logement, nous reprenons les spécifications retenues dans [88]. Le transport distingue le transport collectif (maritime, terrestre et aérien) et le transport individuel qui donne lieu à des dépenses d’équipement (liées à l’usage d’un véhicule) et d’énergie. Pour le logement, la spécification suppose que le ménage peut substituer l’énergie liée à l’utilisation du logement (chauffage, climatisation, eau chaude, électricité spécifique...) en recourant à des logements plus capitalistiques et de ce fait plus efficaces en terme de consommation d’énergie. Pour les postes agriculture et autres consommations, nous supposons que le ménage répartit sa consommation entre les différentes composantes sur la base d’une seule CES. La spécification retenue pour le tourisme est détaillée dans la section 5.5.

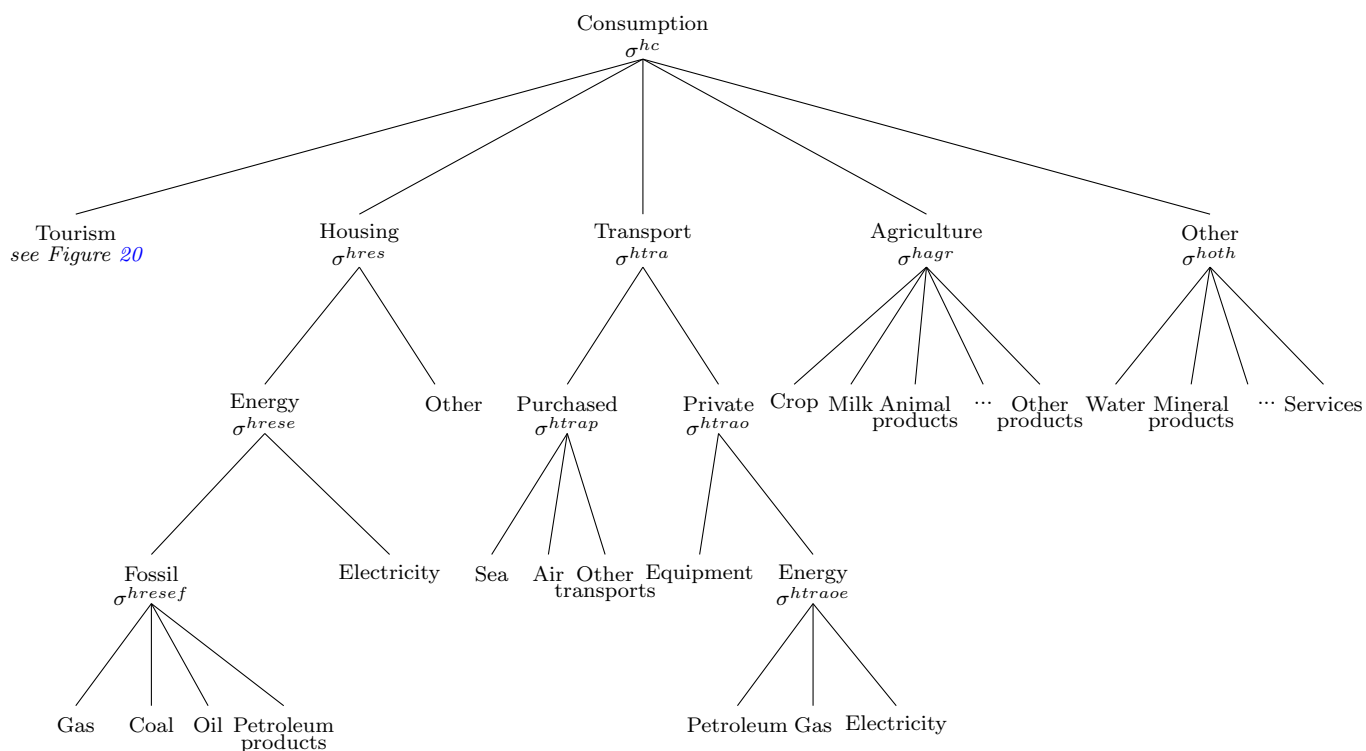


Figure 19 – Arborescence de la fonction de consommation

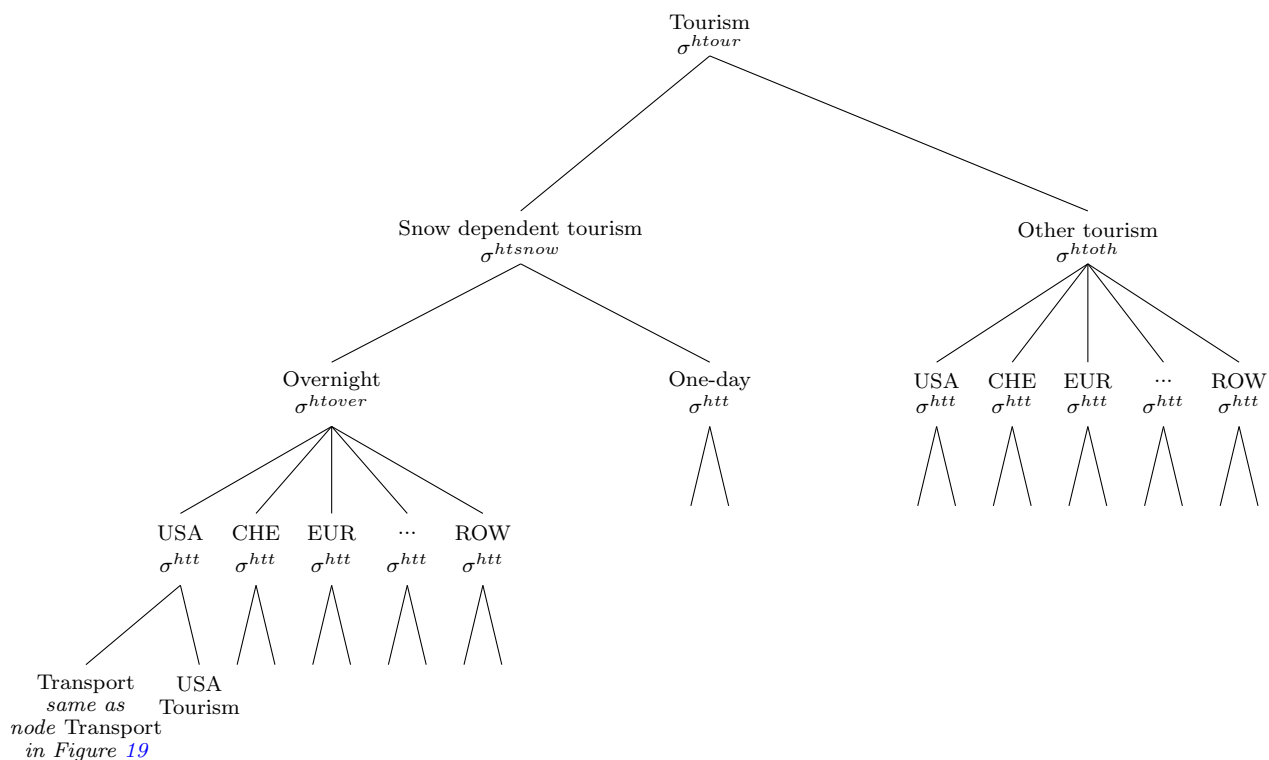


Figure 20 – Détail de la branche tourisme

Tableau 14 – Elasticités de substitution employées pour les segments du tourisme d’hiver dans la fonction de consommation

Elasticities of substitution		
Snow dependent and other tourism	σ^{htour}	0.7
Overnight and one-day tourism	σ^{htsnow}	0.5
Domestic and foreign tourism (overnight)	σ^{htover}	3
Domestic and foreign tourism (other tourism)	σ^{htoth}	3
Transport and other goods consumed	σ^{htt}	0.2

7 La régionalisation des changements climatiques

Le module climatique du modèle GEMINI-E3 ne fournit des variations de température qu’au niveau de notre planète, or l’évaluation des impacts du changement climatique nécessite une régionalisation de cette information et la prise en compte d’autres dimensions climatiques comme l’ont montré les analyses sectorielles réalisées dans les sections précédentes. La connaissance d’autres variables climatiques telles que le niveau des précipitations, la couverture neigeuse, etc., apparaît indispensable si l’on souhaite évaluer les impacts du changement climatique. Nous avons en conséquence décidé d’utiliser les résultats du projet européen ENSEMBLES [51]³³ qui fournit ces informations. Le projet ENSEMBLES a pour objectif de développer un système de prévision sur le changement de climat basé sur des modèles du système climatique, développés en Europe à l’échelle globale et régionale. Il fournit pour l’Europe sur la base de simulations de plusieurs modèles régionaux des informations sur l’évolution du climat jusqu’en 2100 à partir d’un maillage géographique de 25 par 25 km³⁴. Une restriction importante des données du projet ENSEMBLES a trait au scénario de réchauffement envisagé qui ne se base que sur le scénario A1B de l’IPCC [78] et ne prend donc pas en compte plusieurs hypothèses de réchauffement. Cette limitation rend difficile l’évaluation des impacts du changement climatique pour des hypothèses d’émissions différentes du scénario A1B.

Pour le projet, nous allons utiliser les résultats de simulations issus de quatre couplages différents de modèles climatiques globaux (GCMs) et régionaux (RCMs) réalisés dans le cadre du projet ENSEMBLES. Ces quatre combinaisons de modèles sont les suivantes:

Tableau 15 – Choix de couplages de modèles issus du projet ENSEMBLES avec indication de la période de simulation

1.	KNMI - ECHAM5-r3 avec RACMO (1951-2100)
2.	SMHI - BCM-RCA (1961-2100)
3.	C4I - HadCM3Q16-RCA3 (1951-2099)
4.	DMI - ARPEGE-HIRHAM (1951-2100)

Tous ces modèles ont le même système de coordonnées (\Rightarrow rotated grid (0.22° with a rotated pole)) ce qui facilite les manipulations des données climatiques. Ils ont aussi été sélectionnés de telle manière à disposer de la plus grande diversité possible de modèles. Leur horizon de temps couvre généralement la période 1951–2100. Pour les simulations, la période 1961-1990 nous sert

33. Pour plus de détails, on peut se référer au site internet du projet :<http://ensembles-eu.metoffice.com>

34. La Suisse est couverte par 176 de ces mailles.

de période de référence “sans changements climatiques”. Pour les décennies “avec changements climatiques”, nous avons utilisé des valeurs moyennées sur 10 ans (1.1.1995 au 31.12.2004 pour la décennie 2000, 1.1.2005 au 31.12.2014 pour 2010, 1.1.2015 au 31.12.2024 pour 2020, 1.1.2025 au 31.12.2034 pour 2030, 1.1.2035 au 31.12.2044 pour 2040 et 1.1.2045 au 31.12.2054 pour 2050).

Le tableau 16 présente les variables climatiques que nous avons extraites de ces modèles avec l’indication des domaines où elles ont été utilisées afin d’estimer les impacts des changements climatiques.

Tableau 16 – Les variables climatiques extraites d’ENSEMBLES et leurs champs d’application

Champs d’application	Variables climatiques
Energy	
Heating energy demand in buildings	<i>Daily mean temperature</i>
Cooling energy demand in buildings	
Hydro power supply	<i>Monthly precipitation</i>
Nuclear power supply	<i>Monthly mean temperature</i>
Tourism	
Snow-dependent winter tourism segments	<i>Fractional snow cover</i>
Agriculture	
Crops (Barley, Maize, Wheat)	<i>Monthly precipitation</i>
	<i>Monthly mean temperature</i>
Water resource and the water distribution sector	
Water resource	<i>Monthly precipitation</i>

Afin de compléter les analyses effectuées avec les scénarios climatiques d’ENSEMBLES, nous avons aussi utilisé, dans certains domaines, les variations futures de températures des nouveaux scénarios climatiques pour la Suisse (CH2011, cf. [26]). Ces scénarios se basent sur ceux d’ENSEMBLES mais présentent l’avantage par rapport à ces derniers de fournir des prévisions de températures pour trois scénarios d’émissions (A1B, A2, RCP3PD). De plus, la diversité sous-jacente des modèles climatiques d’ENSEMBLES est résumée à l’aide de trois prévisions différentes appelées respectivement “lower”, “medium” et “upper”. Ainsi, les scénarios CH2011 permettent d’appréhender non seulement l’incertitude liée aux émissions futures de gaz à effet de serre mais également celle liée aux modèles climatiques. Enfin, ils fournissent les variations de température et de précipitation pour trois périodes de scénario (2035, 2060 et 2085) par rapport à la période de référence 1980–2009.

8 Le compte de référence

Nous présentons dans cette section le compte de référence (appelé aussi dans la terminologie anglo-saxone *Business As Usual*) utilisé pour simuler les impacts du changement climatique. Ce scénario suppose qu’aucune politique ambitieuse de limitation des gaz à effet de serre n’est mise en place au niveau helvétique et international, par conséquent les émissions de gaz à effet de serre continueraient à croître et le réchauffement climatique s’accroîtrait. La logique du scénario est

donc proche du scénario A1B de l’IPCC [78] utilisé par le projet ENSEMBLES et retenu pour évaluer les conséquences régionales du changement climatique. les sections suivantes détaillent respectivement les prix des énergies retenus, les hypothèses de croissance économique et donne les implications en matière de consommation d’énergie et d’émissions de gaz à effet de serre.

8.1 Le prix des énergies

Concernant les prix des énergies, nous avons retenu les hypothèses utilisées dans l’exercice de projection de l’Agence Internationale de l’Énergie réalisé dans son dernier World Energy Outlook [57]. Le World Energy Outlook ne fournit des prévisions que jusqu’à l’année 2035, nous avons ensuite supposé un maintien des prix à leurs niveaux 2035 sur la période 2036–2050. Le tableau 17 détaille les hypothèses de prix retenues, nous avons utilisé les prix du scénario *current policies*.

Tableau 17 – Prix des énergies - Compte de référence (\$ 2009)

	Unit	2000	2009	2015	2020	2025	2030	2040	2050
IEA Crude oil imports	Baril	34.3	60.4	94.0	110.0	120.0	130.0	135.0	135.0
Natural gas imports Europe	Mbtu	3.5	7.4	10.7	12.1	12.9	13.9	14.4	14.4
OECD Steam coal imports	Tonne	41.2	97.3	97.8	105.8	109.5	112.5	115.0	115.0

Le prix du pétrole est supposé baisser aux alentours de 60.4\$ par baril en 2009 pour ensuite remonter avec la reprise économique et atteindre 110\$ en 2020, puis 135 \$ en 2035 pour ensuite se stabiliser. Le prix du gaz suivrait un cheminement assez similaire et atteindrait 14.4 \$ par Mbtu en 2035. Le prix du charbon atteindrait 115 \$ par tonne en 2035.

8.2 Les hypothèses de croissance économique

Les hypothèses de croissance macro-économique sont basées sur les prévisions du DOE publiées dans l’International Energy Outlook [32] qui sont présentées dans le tableau 18. Pour la Suisse, nous avons retenu les dernières hypothèses de croissance économique réalisées par le Secrétariat d’État à l’économie (SECO). La croissance économique des 6 zones décrites par le modèle GEMINI-E3 est présentée dans le tableau 19.

8.3 La production d’électricité en Suisse

Le nouveau compte de référence prend en compte les dernières décisions quant au devenir du nucléaire en Suisse. Nous avons ainsi retenu une durée de vie de 50 ans des centrales nucléaires, sans nouvel investissement dans cette technologie, conduisant ainsi à une fin du nucléaire en 2035. Le tableau 20 donne les hypothèses retenues concernant l’exploitation des centrales nucléaires tirées de l’actualisation des perspectives énergétiques de l’OFEN [21].

Nous avons supposé une stabilité du potentiel de production d’électricité à partir de l’hydraulique, le remplacement de la production des centrales nucléaires et la satisfaction de la croissance de la demande en électricité doivent alors être réalisés par le recours à de nouvelles sources

Tableau 18 – Produit intérieur brut mondial par région en millions de \$ 2005 (exprimé aux taux de change du marché), Compte de référence, 1990-2035. (Source : [32])

Region/Country	2005	2010	2015	2020	2030	2035	Growth Rate (2008-2035)
OECD							
OECD Americas	14740	15502	17974	20587	26940	30646	2.6%
United States	12638	13240	15313	17479	22726	25731	2.5%
Canada	1134	1202	1368	1528	1887	2106	2.1%
Mexico/Chile	967	1059	1293	1580	2328	2809	3.6%
OECD Europe	14716	15382	17028	18836	22604	24637	1.7%
OECD Asia	6250	6556	7315	7903	8890	9401	1.3%
Japan	4557	4575	4984	5184	5364	5441	0.5%
South Korea	845	1016	1206	1426	1864	2080	2.9%
Australia/New Zealand	848	965	1125	1293	1661	1880	2.7%
Total OECD	35706	37440	42317	47326	58434	64684	2.0%
Non-OECD							
Non-OECD Europe and Eurasia	1313	1552	1867	2157	2854	3268	2.7%
Russia	764	902	1067	1204	1611	1884	2.6%
Other	549	650	801	954	1243	1384	2.7%
Non-OECD Asia	4810	7212	10052	13394	20883	24869	5.3%
China	2257	3832	5543	7555	12015	14261	5.7%
India	840	1225	1736	2382	3752	4478	5.5%
Other	1713	2155	2774	3457	5117	6130	4.2%
Middle East	1082	1371	1748	2127	3031	3584	3.8%
Africa	996	1253	1557	1880	2626	3086	3.6%
Central and South America	1842	2285	2838	3464	5031	6029	3.9%
Brazil	882	1096	1410	1770	2750	3421	4.6%
Other	961	1189	1429	1694	2281	2608	3.1%
Total Non-OECD	10043	13673	18062	23022	34426	40836	4.5%
Total World	45749	51113	60380	70348	92860	105520	2.8%

Tableau 19 – Evolution du PIB - Compte de référence - (Taux de croissance annuel moyen)

	2010-2020	2020-2030	2030-2040	2040-2050
Suisse	1.7%	0.8%	0.9%	0.8%
Union Européenne	1.5%	1.8%	1.7%	1.7%
États-Unis	2.3%	2.7%	2.5%	2.4%
Autres pays de l'OCDE	1.3%	1.1%	1.1%	1.0%
BRIC	6.3%	4.5%	3.6%	3.6%
Reste du Monde	3.9%	3.6%	3.3%	3.3%
Monde	2.8%	2.8%	2.6%	2.6%

Tableau 20 – Durée d'exploitation des centrales nucléaires. (Source : [21])

Centrales nucléaires	Périodes d'exploitation 50 ans
Beznau I (365 Mwe)	1969-2019
Beznau II (365 Mwe)	1972-2022
Mühleberg (373 Mwe)	1972-2022
Gösgen (985 Mwe)	1979-2029
Leibstadt (1190 Mwe)	1984-2034

d'énergie. Le potentiel éolien en Suisse a été supposé limité, dans ces conditions les sources qui apparaissent mobilisables sont le gaz naturel sur la base de centrales à cycle combinés et l'utilisation d'énergies renouvelables majoritairement basée sur le photovoltaïque. Une hypothèse essentielle est liée à l'évolution du coût de la production d'énergie à partir de l'énergie solaire. Nous avons utilisé les hypothèses de prix retenues par l'OFEN pour l'actualisation des ses perspectives énergétiques soit un coût de 64.08 centimes par kWh en 2010 et de 10.61 centimes par kWh en 2050. La figure 21 donne l'évolution de la production d'électricité calculée par le modèle GEMINI-E3. La production d'électricité augmenterait très faiblement sur la période 2010-2050, et ceci pour plusieurs raisons :

- La croissance économique faible de la Suisse se traduirait par une demande atone ;
- Le progrès technique dans l'usage de l'énergie modérerait de plus la demande ;
- Le remplacement des centrales nucléaires par des centrales au gaz naturel et du photovoltaïque augmenterait sensiblement le prix de l'électricité limitant ainsi son usage.

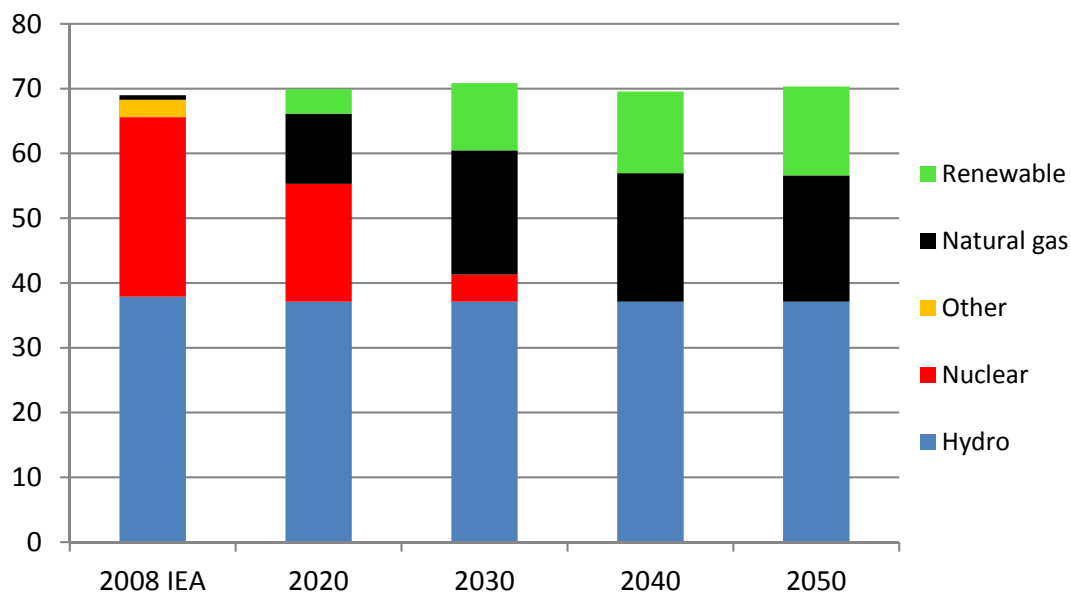


Figure 21 – Production d'électricité en Suisse en TWh

Le remplacement des centrales nucléaires serait principalement réalisé dans un premier temps par des centrales aux gaz naturel, puis la baisse du coût de l'énergie photovoltaïque permettrait de recourir de façon importante à cette énergie.

8.4 Les consommations d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre

Au niveau mondial, comme le montre la figure 22, les consommations d'énergie augmenteraient sur la période 2010–2050 de 1.5% par an. La consommation d'électricité poursuivrait une croissance soutenue (+2.2% par an au niveau mondial) avec pour corollaire une croissance assez forte du charbon pour sa production (+1.6% par an) alors que la croissance de la consommation

des hydrocarbures serait moins soutenue (+1% pour le gaz naturel et 1.2% pour les produits pétroliers).

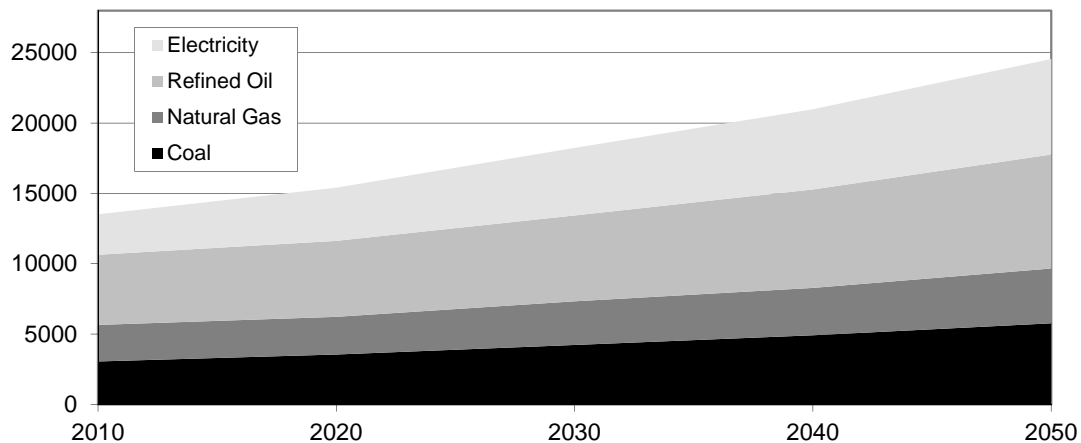


Figure 22 – Consommation mondiale d'énergie en Mtep

En Suisse, les consommations d'énergie fossile resteraient principalement constituées de consommation de produits pétroliers raffinés notamment utilisés pour des usages liés au transport. De son côté, la consommation de gaz naturel diminuerait légèrement sur la seconde période de simulation suite à une baisse de la production d'électricité à partir de cette énergie à partir de 2030. Sur la période 2010-2050, l'augmentation des consommations d'énergie serait limitée à 0.5% par an, le graphique 23 résume cette évolution.

Au niveau des émissions de gaz à effet de serre, la part du CO₂ resterait sensiblement la même sur la période de simulation représentant ainsi 75% des émissions du *panier kyoto* en 2050. Ces émissions augmenteraient sur la période 2010-2050 de 1.3% par an, atteignant 21 Gt de carbone équivalent en 2050 (cf. figure 24). Le tableau 21 donne les émissions de gaz à effet de serre par région. En 2050, les pays en voie de développement (BRI+ROW) représenteraient 76% des émissions mondiales.

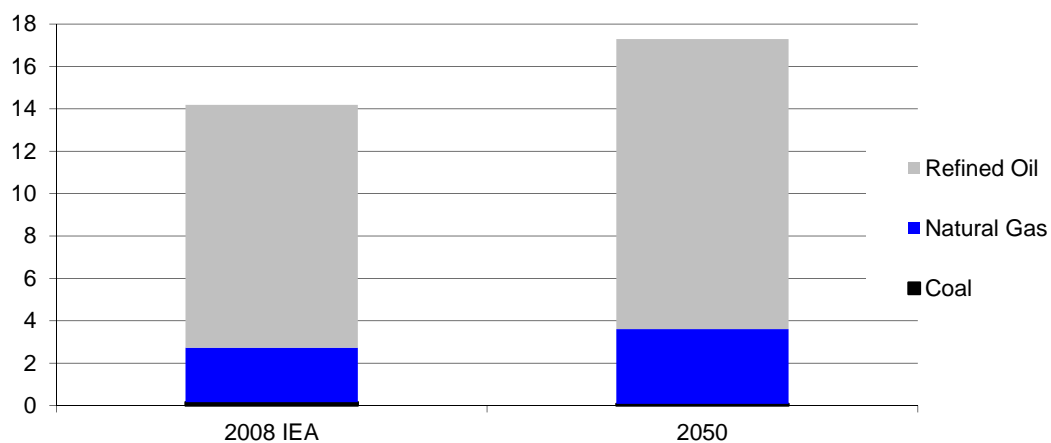


Figure 23 – Consommation suisse d'énergie fossile en Mtep

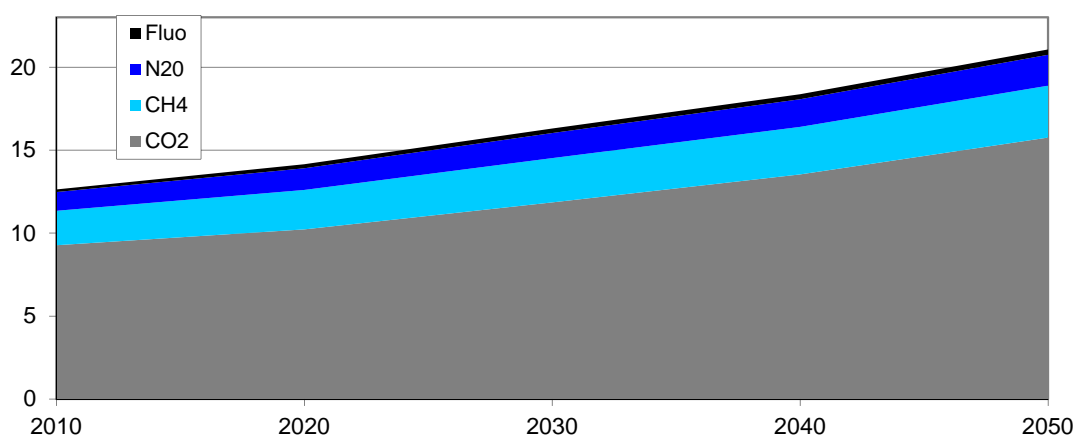


Figure 24 – Emissions mondiales de gaz à effet de serre en GtC-eq

Tableau 21 – Emission de gaz à effet de serre en MtC-eq - Compte de référence

	2010	2020	2030	2040	2050
Suisse	13.1	13.5	14.0	14.2	14.2
Union Européenne	1382	1271	1254	1252	1269
Etats-Unis	2575	2505	2689	2915	3200
Autres pays de l'OCDE	803	756	706	678	653
BRIC	4057	5322	6864	8154	9817
Reste du Monde	3792	4352	4990	5690	6607
Monde	12621	14218	16517	18703	21561

Nous avons cherché à comparer nos émissions par rapport au dernier exercice de l'Energy Modeling Forum (Exercice 22, cf. [28]). Comme l'indique la figure 25, nos émissions se situent sur la période 2010-2030 dans la fourchette basse, cette situation est probablement liée à l'utilisation d'hypothèses de croissance économique plus faibles car intégrant la crise économique récente. Sur le long terme, nos émissions rejoignent les valeurs médianes de l'exercice EMF22.

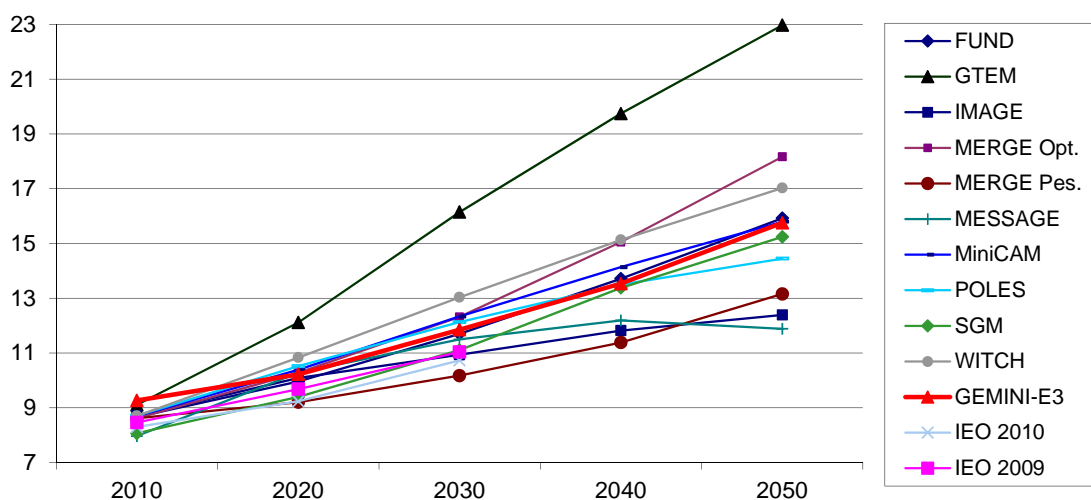


Figure 25 – Comparaison des niveaux d'émission de GEMINI-E3 avec l'exercice EMF22

9 Simulations de l'impact des changements climatiques

9.1 Introduction des impacts du changement climatique sur la ressource en eau brute dans le modèle

Résumé:

L'évolution des ressources en eau brute en Suisse jusqu'en 2050 demeure incertaine. Certains scénarios climatiques prédisent une augmentation des ressources disponibles au niveau annuel, d'autres des diminutions. Ces incertitudes se traduisent par d'importantes variations des impacts économiques simulés dans le modèle. Les prix de l'eau brute se modifient très fortement, mais entraînent des conséquences globales limitées pour l'économie suisse en raison du faible prix actuel de la ressource. Notons que les impacts simulés représentent des estimations très prudentes, puisque le modèle à base annuel GEMINI-E3 n'intègre que très partiellement les variations saisonnières et ne tient pas compte des événements extrêmes.

9.1.1 Variations de la ressource en eau brute

Dans le cadre du projet, une ressource en eau brute a été introduite dans le modèle (cf. la section 2.4.1). Pour évaluer les conséquences du changement climatique sur le secteur de distribution d'eau ainsi que tous les secteurs industriels, agricoles et de services qui utilisent de l'eau comme facteur de production, il faut connaître l'impact quantitatif du changement climatique sur les ressources en eau en Suisse. Idéalement, des scénarios climatiques jusqu'en 2050 servent d'inputs à un modèle hydrologique qui définit les impacts sur les ressources en eau. Ces prédictions permettent ensuite d'établir l'impact quantitatif global sur les ressources en eau en Suisse. Les scénarios climatiques constituent un défi supplémentaire, puisqu'il faut veiller à ce que les scénarios qui servent d'inputs aux modèles hydrologiques soient compatibles avec les scénarios ENSEMBLES utilisés dans cette étude.

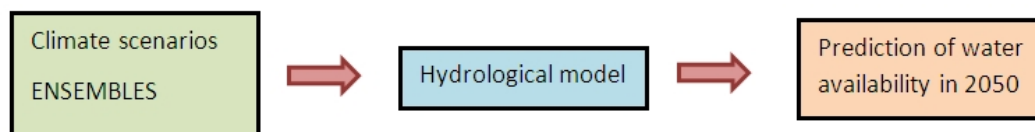


Figure 26 – Impact du changement climatique sur la ressource en eau.

Le projet CCHydro mandaté par l'OFEV [104] fournit des informations sur l'évolution possible du cycle de l'eau et des débits de 2021 à 2100. Il utilise un modèle hydrologique innovant pour simuler l'évolution de paramètres tels que les précipitations, l'évapotranspiration, les débits ou encore la nappe aquifère. Ce projet est sur le point de se terminer maintenant, et les résultats utilisés dans cette étude sont encore provisoires. Les divers secteurs économiques représentés dans GEMINI-E3 utilisent de l'eau souterraine, de source et de surface (cf. la section 2.1). C'est pourquoi les simulations du projet CCHydro de débit et de niveau de l'eau souterraine pour

Tableau 22 – Variations des ressources en eau disponibles en Suisse en 2050 par rapport à la période 1980-2009

Scénarios climatiques	Variations annuelles	Variations irrigation
ETHZ HadCM3Q0 CLM	-6.8%	-15.8%
HC HadCM3Q0 HadRM3Q0	-4.6%	-15.2%
SMHI HadCM3Q3 RCA	9.4%	-2.6%
SMHI ECHAM RCA	3.7%	-7.1%
MPI ECHAM REMO	2.0%	-7.6%
KNMI ECHAM RACMO	4.9%	-4.2%
ICTP ECHAM REGCM	4.2%	-3.3%
DMI ECHAM HIRHAM	3.9%	-2.5%
SMHI BCM RCA	1.5%	-5.5%
CNRM ARPEGE ALADIN	-4.8%	-10.7%
Moyenne C4I, DMI, KNMI, SMHI	-1.3%	-10.8%
Calculs à partir des données du Projet CCHydro [104]		

2050 sont utilisées pour impacter la ressource en eau brute dans le modèle. Il faut noter que la période de référence pour les prévisions du projet CCHydro est 1980 à 2009, soit la période de référence employée pour les prévisions CH2011, et ne coïncide pas avec celle des scénarios climatiques ENSEMBLES utilisée dans les autres secteurs à l'exception de l'énergie, qui s'étend de 1961 à 1990.

Le tableau 22 montre l'évolution des ressources en eau brute en Suisse au niveau annuel et pendant la principale période d'irrigation entre avril et octobre en 2050 simulés avec le modèle hydrologique développé dans le cadre du projet CCHydro pour 10 différents scénarios climatiques. Afin d'obtenir des prévisions de l'évolution de la ressource en eau brute, les évolutions des débits et des eaux souterraines sont combinées au prorata de leur emploi dans l'économie suisse, soit au niveau annuel 43% d'eaux de surface et 57% d'eaux souterraine d'après l'étude de Freiburghaus [39]. Les prévisions annuelles diffèrent fortement selon les scénarios. Certains prévoient une baisse des débits et des eaux souterraines (le plus pessimiste prédit une diminution combinée de près de 7%) alors que d'autres anticipent une augmentation (maximale d'environ 9.5%) pour 2050. L'évolution future des ressources en eau au niveau annuel est donc très incertaine, c'est pourquoi nous simulons dans le cadre du projet plusieurs scénarios possibles.

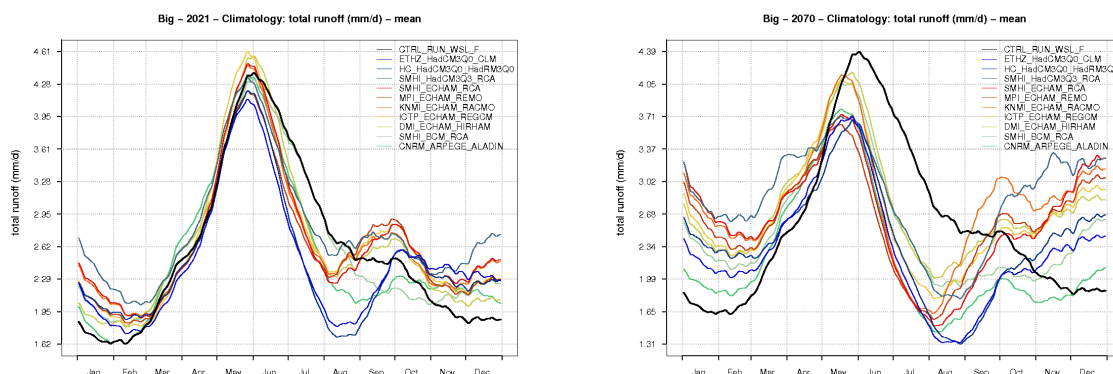


Figure 27 – Débits en Suisse, périodes 2021-2050 et 2070-2099. Source : projet CCHydro [104], copyright WSL

L'évolution annuelle de la ressource en eau brute est entachée d'une grande incertitude et une majorité de scénarios climatiques résultent en un impact très faible du changement climatique sur cette ressource. Ceci s'explique par la nature des impacts des changements climatiques par exemple sur les débits : ces derniers vont augmenter d'octobre à avril mais diminuer de mai à septembre, comme le montre la figure 27. Cette évolution de saisonnalité est difficile à intégrer dans un modèle à base annuelle tel que GEMINI-E3. Néanmoins, il est possible de la prendre en compte pour les secteurs agricoles qui utilisent de l'eau pour irriguer. En effet, nous supposons que les secteurs de production végétale, c'est-à-dire les cultures fourragères ("Crops n.e.c."), les cultures maraîchères ("Vegetables, fruits and nuts") et les autres cultures ("Other agricultural products") nécessitent de l'eau essentiellement au printemps, en été et au début de l'automne, intervalle qui recoupe la période de végétation de nombreuses cultures. C'est pourquoi la ressource en eau brute est séparée en deux blocs dans GEMINI-E3: le premier bloc comprend l'eau d'irrigation, et le second l'eau destinée à tous les autres usages. D'après l'étude de Weber et Schild [102], 92% de l'eau employée pour l'irrigation est de l'eau de surface alors que les 8% restants sont de l'eau souterraine. En appliquant ces parts pour le calcul de l'évolution de l'eau brute destinée à l'irrigation, on obtient les résultats résumés dans le tableau 22. L'eau disponible diminue dans tous les modèles pendant cette période, et ce de 2.5 à 15.8%. A nouveau, le projet simule différents scénarios de manière à prendre en compte les importantes incertitudes liées aux scénarios climatiques.

Pour simuler les impacts économiques de variations dans la disponibilité de la ressource en eau brute, cette étude utilise les deux scénarios climatiques les plus extrêmes parmi les dix scénarios simulés dans le projet CCHydro. Il s'agit du scénario ETHZ, qui prédit une diminution de 6.8% des ressources en eau utilisées pour tous les usages hormis l'irrigation et une baisse de 15.8% de l'eau disponible pour l'irrigation, ainsi que du scénario SMHI Had, selon lequel l'eau disponible pour irriguer va diminuer de 2.6% alors que l'eau pour tous les autres usages augmente de 9.4%.

Il est important de remarquer que les scénarios climatiques employés dans le projet CCHydro ne sont pas tous identiques aux 5 scénarios climatiques (C4I, DMI, KNMI, SMHI ainsi que la moyenne de ces 4 modèles) utilisés pour calculer les impacts des changements climatiques dans les autres secteurs analysés dans cette étude. Afin de garantir la cohérence et la comparabilité des résultats dans cette étude, il faut néanmoins assurer la compatibilité des analyses sectorielles, raison pour laquelle il faut également connaître l'évolution de la ressource en eau selon les mêmes scénarios climatiques utilisés dans les autres secteurs. Nous avons décidé de nous concentrer sur le scénario qui représente la moyenne de C4I, DMI, KNMI et SMHI. Comme ces scénarios ne sont pas tous simulés avec le modèle hydrologique, nous avons tout d'abord estimé la relation entre l'évolution des débits et l'évolution des précipitations d'une part ainsi que l'évolution des eaux souterraines et celle des précipitations d'autre part dans les scénarios CCHydro. Ensuite, nous avons appliqué ces relations à l'évolution des précipitations dans le modèle qui représente la moyenne de C4I, DMI, KNMI et SMHI afin d'obtenir la variation des débits et eaux de surface pour ce scénario. Cette même méthodologie est également appliquée pour calculer la variation des débits dans la section 9.4.3 qui traite de l'énergie hydraulique.

9.1.2 Impacts économiques des variations de la ressource en eau brute : les scénarios climatiques

Plusieurs scénarios sont simulés pour cette étude. Ils se distinguent d'après le potentiel d'adaptation et l'évolution de la ressource en eau brute. L'adaptation est endogène au modèle et les divers niveaux d'adaptation correspondent à différentes élasticités de substitution entre la ressource en

eau brute et les autres inputs.

Tout d'abord, 4 scénarios à potentiel d'adaptation moyen sont simulés. Ils divergent de par l'impact climatique imposé sur la ressource en eau brute. Nous simulons tout d'abord les deux scénarios climatiques les plus extrêmes calculés à partir des données CCHydro. Pour illustrer l'impact qu'aurait une réduction très forte des ressources en eau, une diminution de 20% tant pour l'eau d'irrigation que pour l'eau destinée à d'autres usages est également analysée. De plus, un scénario moyen (moyenne de C4I, DMI, KNMI et SMHI), identique à celui estimé pour les autres secteurs, est étudié:

- Scénario 1 (ETHZ): la disponibilité d'eau brute réplique les prédictions CCHydro du scénario climatique ETHZ,
- Scénario 2 (SMHI): la disponibilité d'eau brute réplique les prédictions CCHydro du scénario climatique SMHI,
- Scénario 3 (-20): la disponibilité des deux ressources en eau brute diminue de 20 pourcent,
- Scénario 4 (mean): la disponibilité d'eau brute réplique les prédictions du scénario climatique moyen,

Le tableau 23 résume les résultats des simulations. Cette section se concentre surtout sur les conséquences de variations de la disponibilité de la ressource en eau brute dans les secteurs industriels et tertiaires, une analyse plus spécifique des secteurs agricoles se trouve dans la section 9.2.3. Globalement, les impacts économiques sont assez limités en Suisse pour les trois scénarios se basant sur les simulations CCHydro; le surplus total varie de +31.9 à -61.2 millions de CHF₂₀₁₀ par rapport au compte de référence selon les scénarios. Le scénario -20 entraîne quant à lui une perte de bien-être plus importante de 276.1 millions de CHF₂₀₁₀ en 2050. Ce chiffre paraît élevé en termes absolus mais ne représente pourtant que 0.04 pourcent du surplus suisse total. Les impacts sur les prix surtout de l'eau brute sont parfois très importants en termes relatifs, mais ils se traduisent par des conséquences économiques limitées car la valeur de l'eau brute est très faible en 2001 (0.01 CHF₂₀₁₀ par m³ d'eau brute) et dans le compte de référence. En effet les prix des ressources en eau brute pour l'irrigation ainsi que les autres usages atteignent respectivement 0.05 et 0.19 CHF₂₀₁₀ par m³ en 2050 dans la baseline.

Les 4 premiers scénarios se caractérisent tous par l'intégration de possibilités d'adaptation endogènes au modèle et différent d'après les scénarios climatiques retenus. Les résultats des simulations montrent que l'incertitude face à l'évolution de la disponibilité des ressources se retrouve dans le calcul des impacts économiques. En effet, le scénario 2, basé sur le scénario climatique le plus optimiste prédisant une augmentation des ressources en eau brute disponibles annuellement, se traduit par un impact économique global positif de 31.9 millions de CHF₂₀₁₀ par rapport au compte de référence en 2050. Le scénario climatique le plus contraignant émanant du projet CCHydro est simulé dans le scénario 1. Il résulte en une perte de bien-être équivalente à 61.2 millions de CHF₂₀₁₀. Enfin, le scénario 3 engendre une perte de 276.1 millions de CHF₂₀₁₀ soit 0.04 pourcent du surplus suisse total.

Les prix tant de l'eau brute pour l'irrigation que de l'eau brute destinée aux autres usages varient fortement en termes relatifs par rapport au compte de référence, et ce d'autant plus que les contraintes imposées sur la ressource sont fortes. Le tableau 23 énonce les variations des prix de l'eau potable, l'eau industrielle et l'eau d'irrigation. Ces dernières résultent de la combinaison respective d'eau brute destinées aux usages autres que l'irrigation et de l'eau brute d'irrigation avec du capital et de l'énergie nécessaires à son extraction. Les variations de prix sont souvent

Tableau 23 – Résultats des simulations avec différents scénarios climatiques, variations par rapport au compte de référence

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Scénario climatique	ETHZ	SMHI	-20%	Moyen
Evolution des ressources en eau brute				
Eau hors irrigation	-6.8%	9.4%	-20.0%	-1.3%
Eau irrigation	-15.8%	-2.6%	-20.0%	-10.8%
Prix de production				
Eau industrielle	46.6%	-32.8%	229.9%	7.1%
Eau d'irrigation	64.6%	7.7%	88.9%	38.2%
Eau potable	12.4%	-8.8%	60.9%	1.9%
Consommation d'eau potable				
Consommation totale	-3.2%	2.6%	-11.9%	-0.5%
Consommation des ménages	-2.3%	1.9%	-9.1%	-0.4%
Surplus (en millions de CHF 2010)	-61.2	31.9	-276.1	-14.0
Coûts directs (en millions de CHF 2010)	23.8	-31.3	68.3	5.1

plus importantes pour l'eau d'irrigation en raison de la saisonnalité de son usage. En revanche le scénario 4, qui simule une baisse de 20% de l'eau quel que soit son usage, provoque une augmentation relative plus forte du prix de l'eau industrielle. Ainsi le prix de production de l'eau d'irrigation se renchérit de 7.7 à 88.9% selon les scénarios climatiques, alors que le prix de l'eau industrielle varie entre -32.8 et +229.9%. Le prix de l'eau potable subit bien sûr l'impact des renchérissements ou diminution de prix de la ressource en eau brute, qui est un de ses inputs et aussi un substitut possible à l'eau potable pour les autres secteurs. Ainsi on observe une augmentation du prix producteur de l'eau potable de 12.4% pour le scénario de CCHydro qui prévoit la baisse la plus importante des ressources en eau disponibles (scénario 1). Le scénario climatique moyen provoque un renchérissement relatif de 1.9%, et le prix producteur de l'eau potable diminue même de 8.8% lorsqu'on suppose une augmentation annuelle des ressources en eau disponibles (scénario 2). Enfin, on peut voir que la consommation d'eau potable par l'économie suisse diminue légèrement en termes relatifs par rapport au compte de référence dans tous les scénarios hormis le scénario 2, conséquence logique des augmentations de prix de production.

Les secteurs les plus touchés par les variations de disponibilité de ressources en eau brute sont en termes de production la distribution d'eau potable, les légumes, les céréales, les autres produits agricoles, la chimie ainsi que les secteurs liés aux activités de sport d'hiver.

Il est intéressant de remarquer que les coûts moyens de production des différents secteurs qui utilisent de l'eau augmentent dans les scénarios qui supposent une raréfaction des ressources, d'une part car l'eau brute se renchérit, et d'autre part à cause de l'augmentation des dépenses pour les autres inputs dans la production. En effet, les secteurs substituent l'eau par d'autres facteurs lorsque le prix de la ressource augmente. C'est par exemple ce que l'on observe dans le scénario ETHZ, pour lequel les coûts moyens augmentent par rapport à la baseline. Ceci provoque au niveau de production observé après les changements climatiques une augmentation des coûts de production en 2050 de 299 millions de CHF₂₀₁₀.

Enfin, nous avons calculé les coûts directs des changements climatiques liés à une variation

de disponibilité des ressources en eau brute. Ils représentent la perte ou le gain en termes de valeur monétaire de la ressource d'eau brute et sont définis comme la variation de la quantité disponible des ressources en eau en 2050 dans les scénarios avec changement climatique par rapport à la baseline multipliée par le prix de la ressource dans le compte de référence. Pour les scénarios climatiques ETHZ, KNMI, -20 et Mean ceci représente respectivement des coûts de 23.8, -31.3, 68.3 et 5.1 millions de CHF₂₀₁₀. Ces coûts (ou bénéfices) directs sont plus faibles que les pertes (ou gains) de bien-être évalués à l'aide du modèle GEMINI-E3. En effet, le prix actuel des ressources en eau ainsi que sa valeur dans la baseline sont très faibles, la ressource est actuellement sous-évaluée en Suisse. Il en résulte des coûts directs assez faibles. En revanche, l'eau est difficile à substituer pour les ménages et dans de nombreux processus de production, ce qui explique l'impact sur le bien-être relativement plus élevé que les coûts directs.

9.1.3 Impacts économiques des variations de la ressource en eau brute : la capacité endogène d'adaptation

Les scénarios 5 à 15 étudient l'impact de la capacité d'adaptation endogène au modèle:

- Scénario 5 (faible adaptation extraction d'eau): diminue les élasticités de substitution entre l'eau brute et les autres inputs à $\sigma = 0$ and $\sigma_{wother} = 0.01$,
- Scénario 6 (faible adaptation dans l'industrie): diminue l'élasticité de substitution entre l'eau industrielle et les autres inputs à $\sigma_{ind} = 0.1$,
- Scénario 7 (forte adaptation dans l'industrie): augmente l'élasticité de substitution entre l'eau industrielle et les autres inputs à $\sigma_{ind} = 0.5$,
- Scénario 8 (faible adaptation agricole): diminue l'élasticité de substitution entre terre et irrigation à $\sigma_{lw} = 0.1$ dans les secteurs d'agriculture végétale,
- Scénario 9 (forte adaptation agricole): augmente l'élasticité de substitution entre terre et irrigation à $\sigma_{lw} = 0.5$ dans les secteurs d'agriculture végétale,
- Scénario 10 (faible substituabilité de l'eau industrielle/d'irrigation avec l'eau potable): diminue l'élasticité de substitution entre eau industrielle/d'irrigation à $\sigma_w = 0.1$ pour les secteurs métallurgiques, chimiques et les biens de consommation et $\sigma_w = 0.001$ pour tous les autres secteurs,
- Scénario 11 (forte substituabilité de l'eau industrielle/d'irrigation avec l'eau potable): augmente l'élasticité de substitution entre eau industrielle/d'irrigation à $\sigma_w = 0.5$ pour les secteurs métallurgiques, chimiques et les biens de consommation et $\sigma_w = 0.3$ pour tous les autres secteurs,
- Scénario 12 (faible adaptation des ménages): diminue l'élasticité de substitution entre les biens dans le nest "Other" dans la structure de consommation des ménages à $\sigma_{hoth} = 0$,
- Scénario 13 (forte adaptation des ménages): augmente l'élasticité de substitution entre les biens dans le nest "Other" dans la structure de consommation des ménages à $\sigma_{hoth} = 0.4$.
- Scénario 14 (faible adaptation): diminue simultanément les élasticités de substitution entre les biens telles que décrites dans les scénarios 6, 8, 10 et 12.
- Scénario 15 (forte adaptation): augmente simultanément les élasticités de substitution entre les biens telles que décrites dans les scénarios 7, 9, 11 et 13.

Dans les scénarios 5 à 15, la disponibilité d'eau brute suit les prédictions CCHydro pour le scénario climatique ETHZ. Les mesures de sensibilité des résultats aux possibilités d'adaptation sont estimées avec le scénario climatique de CCHydro qui prévoit la baisse la plus forte des ressources en eau, de manière à avoir une analyse plus précise de la situation la plus défavorable qui puisse se produire.

Tableau 24 – Résultats des simulations pour l'eau

Scénarios	1	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Scénario climatique ETHZ												
Ressource en eau brute	-6.8%	-6.8%	-6.8%	-6.8%	-6.8%	-6.8%	-6.8%	-6.8%	-6.8%	-6.8%	-6.8%	-6.8%
Ressource en eau brute irrigation	-15.8%	-15.8%	-15.8%	-15.8%	-15.8%	-15.8%	-15.8%	-15.8%	-15.8%	-15.8%	-15.8%	-15.8%
Prix de production												
Eau industrielle	46.6%	53.1%	89.3%	31.8%	46.8%	46.5%	49.3%	42.2%	52.7%	41.5%	149.4%	28.0%
Eau d'irrigation	64.6%	80.5%	63.4%	65.0%	240.1%	37.9%	67.1%	59.6%	64.4%	64.8%	269.7%	36.6%
Eau potable	12.4%	18.3%	23.9%	8.4%	12.5%	12.4%	13.2%	11.2%	14.1%	11.0%	39.7%	7.3%
Consommation d'eau potable												
Total	-3.2%	-4.4%	-3.2%	-3.3%	-3.2%	-3.2%	-3.7%	-2.4%	-2.3%	-4.0%	-2.2%	-3.2%
Ménages	-2.3%	-3.3%	-4.2%	-1.6%	-2.3%	-2.3%	-2.5%	-2.1%	0.0%	-4.1%	0.0%	-2.8%
Surplus (en millions de CHF 2010)	-61.2	-70.0	-71.9	-57.7	-65.5	-60.7	-62.7	-58.8	-62.3	-60.6	-92.4	-55.5

Tout d'abord, le scénario 5 cherche à répondre à la question suivante: que se passerait-il si le secteur de distribution d'eau, l'industrie et les secteurs agricoles ne pouvaient pas substituer la ressource en eau brute par d'autres inputs pour s'adapter au changement climatique, par exemple en investissant d'avantage dans le capital pour réduire les pertes d'eau ? Pour répondre à cette question, les élasticité de substitution entre l'eau brute et les autres inputs sont réduites à $\sigma = 0$ and $\sigma_{wother} = 0.01$. L'élasticité σ_{wother} n'est pas égale à 0 car le modèle ne converge pas lorsqu'une Leontief est utilisée. Notons qu'une élasticité de 0.01 limite déjà fortement les possibilités de substitution. On peut comparer les résultats du scénario 5 à ceux du scénario 1, qui applique le même scénario climatique ETHZ mais permet l'adaptation.

La réduction des possibilités d'adaptation provoque une augmentation des prix de l'eau industrielle, d'irrigation et potable plus poussée (+53.1% dans le scénario 5 contre +46.6% dans le scénario 1 pour l'eau industrielle par exemple ou encore +18.3% dans le scénario 5 contre +12.4% dans le scénario 1 pour l'eau potable). La hausse du prix de l'eau potable se traduit par une diminution plus prononcée de la consommation d'eau potable par rapport au compte de référence. Les hausses de prix de l'eau brute et de l'eau potable observées après la restriction de l'adaptation provoquent enfin des diminutions de production dans les secteurs qui consomment beaucoup de cette ressource, tels que la chimie, dont la production diminue de 0.5% dans le scénario 5, alors que la baisse est de 0.2% dans le scénario 1. L'effet global de la restriction des possibilités d'adaptation pour l'économie suisse se mesure à l'aide des surplus. Alors que dans le scénario 1, la baisse de surplus est de 61.2 millions de CHF₂₀₁₀, elle se monte à 70 millions de CHF₂₀₁₀ dans le scénario 5. La limitation de l'adaptation endogène provoque donc dans ce cas une augmentation de la perte de bien être d'environ 15%. Enfin, il est intéressant de noter que dans le scénario 1, les pertes des distributeurs d'eau se réduisent à 5% de la quantité extraite, alors que dans le scénario 5, elles demeurent à leur niveau actuel d'environ 15%, puisque les possibilités d'adaptation à travers des investissements supplémentaires en capital sont éliminées.

Aucun scénario proposant des élasticités de substitution supérieures à $\sigma = 0.025$ and $\sigma_{wother} = 0.025$ n'est simulé, car des élasticités par exemple de 0.05 entraînent des pertes d'eau en 2050 proche de 0 ou parfois même négatives, ce qui n'est pas justifiable techniquement.

Ensuite, les scénarios 6 et 7 étudient l'impact d'une réduction de la capacité d'adaptation dans les secteurs d'industrie et de service. Pour ce faire, l'élasticité de substitution σ_{ind} entre eau et autres facteurs de production dans les secteurs industriels et tertiaires est réduite (scénario 6) ou augmentée (scénario 7). Nous modifions ainsi les opportunités de s'adapter par exemple en introduisant des procédés de production moins intenses en eau. Les scénarios 6 et 7 sont à nouveau comparables au scénario 1. La limitation de l'adaptation accentue les impacts d'une restriction de la disponibilité des ressources en eau brute sur le prix de cette dernière et par conséquent sur les prix de l'eau industrielle et de l'eau potable, qui augmentent respectivement de 89.3 et 23.9% par rapport au compte de référence dans le scénario 6, alors que le scénario 1 se caractérise par des hausses de 46.6 et 12.4%. Les effets sont inversés dans le scénario 7. Globalement, cette restriction de l'adaptation entraîne une perte de bien-être de 71.9 millions de CHF₂₀₁₀, alors que le scénario 7 qui augmente la capacité d'adaptation se caractérise par une perte de bien-être de 57.7 millions de CHF₂₀₁₀ par rapport à la baseline. La capacité endogène à s'adapter aux changements climatiques en adoptant des processus de production moins intenses en eau dans les secteurs secondaires et tertiaires a donc bien un impact notable sur le surplus de l'économie suisse.

L'impact de la capacité endogène des secteurs agricoles qui irriguent à s'adapter aux changements climatiques est analysé dans les scénarios 8 et 9, qui simulent les conséquences des changements

climatiques avec respectivement une plus faible et une plus forte substituabilité entre le facteur terre et l'irrigation. Ces modifications impactent surtout les secteurs agricoles. Ainsi, les prix de l'eau d'irrigation changent fortement. Alors que le scénario 8 à faible adaptation voit ce prix augmenter de 240%, la hausse ne comporte que 37.9% dans le scénario 9 à forte adaptation. La perte de bien-être dans le scénario 8 dépasse celle du scénario 9 d'environ 5 millions de CHF₂₀₁₀.

Les scénarios 10 et 11 s'intéressent aux conséquences d'une difficulté accrue à remplacer l'eau potable par de l'eau industrielle ou d'irrigation. Sans surprises, restreindre la substituabilité augmente tant les prix de l'eau potable que ceux de l'eau industrielle et d'irrigation. La consommation d'eau potable diminue lorsqu'il devient plus difficile de substituer eau industrielle ou eau d'irrigation et eau potable. De plus, le scénario 10 résulte en une perte de bien-être supplémentaire d'environ 4 millions de CHF₂₀₁₀ par rapport au scénario 11. La capacité endogène à s'adapter des ménages fait l'objet des scénarios 12 et 13. Les simulations montrent la robustesse des résultats à des variations de cette dernière.

Enfin, les scénarios 14 et 15 combinent respectivement les scénarios 6, 8, 10 et 12 ainsi que les scénarios 7, 9, 11 et 13. Le scénario 14 décrit une économie suisse qui, face aux changements climatiques et plus particulièrement la variabilité de la ressource en eau, peine à s'adapter. Tant les possibilités de substituer l'eau industrielle par d'autres facteurs, l'irrigation par de la terre, l'eau potable par de l'eau industrielle ou d'irrigation que la capacité des ménages à adopter des styles de vie qui nécessitent moins d'eau sont limités dans ce scénario. Le scénario 15 représente le cas parallèle du scénario 14 mais cette fois avec des capacités d'adaptation endogènes fortes. Dans ces deux scénarios, seules les élasticités de substitution entre l'eau brute et les autres inputs à σ et σ_{wother} gardent leur valeur initiale de 0.025. Ce choix s'explique par soucis de comparabilité entre les 2 scénarios, puisqu'une élasticité plus élevée conduit à des pertes négatives et une élasticité plus faible contraint trop fortement le modèle. Le scénario 14 se caractérise par de fortes augmentations des prix de l'eau industrielle, d'irrigation et potable respectivement de 149.4, 269.7 et 39.7% par rapport à la baseline, alors qu'au contraire des hausses de prix bien plus faibles de 28, 36.6 et 7.3 % par rapport à la baseline sont observées dans le scénario 15. Globalement, la perte de bien-être se chiffre à 92.4 millions de CHF₂₀₁₀ dans le scénario à faible adaptation alors qu'elle se monte à 55.5 millions si l'on suppose une forte capacité d'adaptation. L'augmentation de la capacité d'adaptation endogène permet donc de réduire la perte de bien-être d'environ 40%.

En résumé, il faut retenir que l'adaptation endogène permet de réduire notablement les pertes de bien-être provoquées par la réduction de la disponibilité des ressources en eau. La capacité à réduire les pertes d'eau dans tous les secteurs y compris la distribution d'eau ainsi que les possibilités des secteurs secondaires et tertiaires à adapter leurs processus de production de manière à les rendre moins intensifs en eau revêtent une importance particulière.

9.1.4 Impacts économiques des variations de la ressource en eau brute : l'adaptation exogène

A nouveau, le scénario climatique ETHZ sert de base d'analyse. Dans ce scénario, une diminution de disponibilité des ressources en eau provoque une augmentation des prix de l'eau brute et par conséquent une hausse des prix de l'eau d'irrigation, industrielle et potable. L'eau potable est consommée dans les secteurs primaires, secondaires, tertiaires ainsi que par les ménages. Ces utilisateurs sont dès lors concurrents pour l'usage de ce bien. Cette étude analyse la possibilité de subventionner l'eau potable pour les ménages de manière à garder le prix de l'eau potable constant pour ces derniers. Cette mesure établit indirectement la priorité de l'usage domestique

de l'eau potable sur la consommation par les secteurs économiques primaires, secondaires et tertiaires.

Le tableau 25 décrit les résultats de simulations pour ce scénario ainsi que le scénario ETHZ à titre de comparaison.

L'introduction de la subvention provoque une diminution du prix de l'eau potable pour les ménages, dont la consommation reste dès lors constante par rapport au compte de référence et augmente par rapport au scénario ETHZ sans subvention. Le prix de l'eau potable pour les consommateurs autres que les ménages et le prix de l'eau industrielle augmentent en revanche suite à l'introduction de cette subvention et les consommations d'eau brute et d'eau potable des secteurs secondaires et tertiaires diminuent. Le montant total de la subvention s'élève à 147.7 millions de CHF₂₀₁₀. La perte de bien-être causée par le subventionnement se monte à environ 3 millions de CHF₂₀₁₀.

Tableau 25 – Résultats des simulations avec subvention, variations par rapport au compte de référence

Scénarios	ETHZ	ETHZ + Subvention
Scénario climatique ETHZ		
Ressource en eau brute	-6.8%	-6.8%
Ressource en eau brute d'irrigation	-15.8%	-15.8%
Prix de production		
Eau industrielle	46.6%	54.0%
Eau d'irrigation	64.6%	64.4%
Eau potable	12.4%	14.4%
Consommation d'eau potable		
Total	-3.2%	-2.2%
Ménages	-2.3%	0.0%
Surplus (en millions de CHF 2010)	-61.2	-64.1
Subvention (en millions de CHF 2010)		147.7

9.2 Impacts des changements climatiques sur le secteur agricole

Résumé:

Les conséquences économiques des changements climatiques sur l'agriculture sont simulées à partir de variations des ressources en eau brute disponibles pour tous les secteurs agricoles ainsi que de l'impact de changements de température sur les rendements agricoles du secteur des "autres produits agricoles". L'analyse se limite à ce secteur faute de disponibilité de données. Les variations de température ont un effet incertain sur la production agricole, qui augmente ou diminue très légèrement selon les scénarios climatiques retenus. Les diminutions des ressources en eau brute disponibles pour l'irrigation font légèrement baisser les productions agricoles. L'effet conjoint des températures et de l'eau entraîne une faible perte de bien-être dans tous les scénarios. Cette étude sous-estime probablement l'impact des changements climatiques, puisqu'elle ne tient pas compte de l'évolution des précipitations et n'introduit les conséquences de variations de températures que pour un secteur. De plus, elle n'intègre pas les événements extrêmes et les impacts des changements climatiques en dehors de la Suisse, deux éléments dont les conséquences sur les secteurs agricoles pourraient être importantes.

9.2.1 Impacts sur les rendements

Notre premier objectif a été d'évaluer la sensibilité de la production agricole aux températures et précipitations³⁵. Pour ce faire, nous utilisons une base de données mise à disposition par David Lobell de l'université de Stanford en marge de la publication d'un article dans la revue Science

35. L'effet de la fertilisation des cultures à travers la hausse de la concentration de CO₂ ne sera pas abordé dans cette sous-section ni dans les suivantes.

(cf. [69])³⁶. Cette base lie des séries annuelles de rendement de l’organisation des Nations Unies pour l’alimentation et l’agriculture (FAO) pour six cultures avec des séries de températures et de précipitations spécifiques à chaque pays et à chaque culture pour la période allant de 1961 à 2008. Les variables climatiques représentent les conditions mensuelles moyennes de température et de précipitations durant la période de croissance des cultures. Elles ont été construites à partir de données climatiques fournies par l’université du Delaware (UDel)³⁷. Nous avons donc utilisé cette base de données afin d’estimer l’impact des températures et des précipitations sur les rendements de trois cultures (orge, maïs grain et blé) en nous basant exclusivement sur des données de pays européens. Le modèle du rendement que nous avons estimé, qui est le même que celui spécifié dans le supplément de Lobell et al. [69], est le suivant³⁸:

$$\begin{aligned}\ln(Y_{it}) &= f(T_{it}, P_{it}, year_t) + \varepsilon_{it} \\ &= c_i + \beta_1 \cdot T_{it} + \beta_2 \cdot T_{it}^2 + \beta_3 \cdot P_{it} + \beta_4 \cdot P_{it}^2 \\ &\quad + d_{1i} \cdot year_t + d_{2i} \cdot year_t^2 + \varepsilon_{it}\end{aligned}\tag{6}$$

Les termes quadratiques en T et P permettent de modéliser le fait que les rendements baissent lorsque les niveaux de températures et de précipitations deviennent trop faibles ou trop élevés. Le trend temporel ajouté au modèle est également quadratique et est spécifique à chaque pays. Les résultats complets des régressions sont présentés à l’annexe C.1.

Ci-dessous, nous utiliserons les résultats de la première (Barley UDel), de la quatrième (Maize UDel) et de la septième colonne (Wheat UDel) du tableau 54 de l’annexe C.1 parce qu’ils ont été obtenus avec le modèle et la base de données climatiques qui ont servi de référence à Lobell et al. [69]. Ces résultats confirment statistiquement l’effet négatif des températures et des précipitations sur les rendements lorsque ces variables prennent des valeurs trop faibles ou, au contraire, trop élevées. Ayant obtenu une estimation de la sensibilité des rendements de l’orge, du blé et du maïs grain aux températures et aux précipitations, nous avons ensuite déduit les variations de ces variables en Suisse jusqu’à l’horizon 2090 à l’aide des modèles climatiques du projet européen ENSEMBLES. Ces variations sont différentes d’une culture à l’autre, notamment parce que nous les avons calculées sur des périodes différentes qui correspondent aux périodes de croissance des cultures³⁹.

36. La base de données est disponible à l’adresse suivante : <https://pangea.stanford.edu/researchgroups/lobelllab/data-test-1-0>

37. Afin de tester la robustesse de leurs résultats, Lobell et al. [69] ont aussi utilisé les données climatiques du Climate Research Unit (CRU) afin de construire les variables de températures et de précipitations. Cette base de données couvre un nombre d’années moins important que UDel (1961–2002 versus 1961–2008).

38. Pour chaque culture, Lobell et al. [69] distinguent quatre échantillons de pays sur la base des quartiles des rendements moyens. La Suisse faisant partie des pays du quartile supérieur de chaque culture, nous avons par conséquent basé les estimations de l’équation 6 sur les données de ces pays-là, en ne retenant toutefois que les pays européens. Pour le maïs, nous avons également exclu quatre pays de l’échantillon, à savoir la Grèce, la Macédoine, le Portugal et l’Espagne, car la présence de ces pays dans le groupe des pays avec un rendement moyen élevé indique assez clairement un recours important à l’irrigation.

39. Blé et orge semés en automne constituent la plus grande partie de la production suisse pour ces deux cultures. Dans le cas du blé, la période que nous prenons en compte, suivant Lobell et al. [69], englobe les quatre mois précédant la date de la récolte.

Tableau 26 – Growing seasons of barley, maize and wheat for Switzerland. (Source: [2], [53] and communication from the Swiss Federal Office for Agriculture)

	Crop ^{1,2}	Growing season (months)
1	Barley	October—June
2	Maize	May—November
3	Wheat	March—July

¹ Barley, wheat: winter crops.

² Maize: only grain maize.

Pour chaque culture, les valeurs de températures et de précipitations calculées pour les différents points de la maille doivent pouvoir être agrégées afin d’obtenir des valeurs uniques pour la Suisse. Dans ce but, nous utilisons la statistique de la superficie 2004/09 de l’OFS qui fournit des données sur la surface de terres arables par commune afin de dériver un jeu de poids que nous appliquons ensuite aux différents points de la maille ⁴⁰. Les poids obtenus sont présentés ci-dessous:

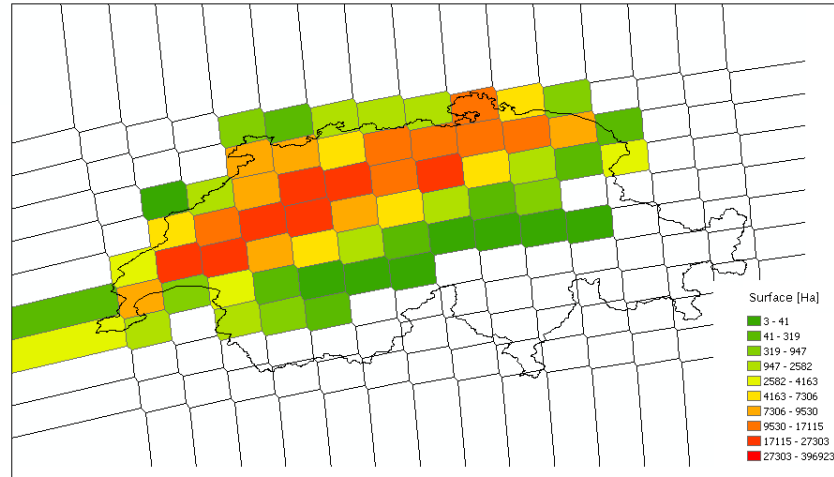


Figure 28 – Poids obtenus pour l’agriculture en Suisse à partir des données sur la surface de terres arables par commune. (Source: Statistique de la superficie, OFS)

Pour chacune des trois cultures, nous avons ensuite pu estimer les variations en % des rendements en 2050 par rapport à la période de référence 1961–1990 en utilisant la formule suivante:

$$\begin{aligned}
 \widehat{\Delta Y/Y} &= e^{\widehat{\Delta \ln(Y)}} - 1 \\
 &= e^{\left[\hat{f}(T+\Delta T, P+\Delta P, year) - \hat{f}(T, P, year)\right]} - 1 \\
 &= e^{\left[\hat{\beta}_1 \cdot \Delta T + \hat{\beta}_2 \cdot ((T+\Delta T)^2 - T^2) + \hat{\beta}_3 \cdot \Delta P + \hat{\beta}_4 \cdot ((P+\Delta P)^2 - P^2)\right]} - 1
 \end{aligned} \tag{7}$$

40. La statistique de la superficie de l’OFS distingue 4 sortes de surfaces agricoles: 1/Arboriculture fruitière, viticulture, horticulture, 2/Terres arables, 3/Prairies naturelles, pâturages locaux et 4/Alpages. Comme la figure 28 le montre, la statistique de l’OFS sur les surfaces agricoles est malheureusement lacunaire pour la plupart des communes des cantons des Grisons et du Tessin.

Les résultats obtenus pour la Suisse (avec intervalle de confiance à 95%) sont présentés ci-dessous:

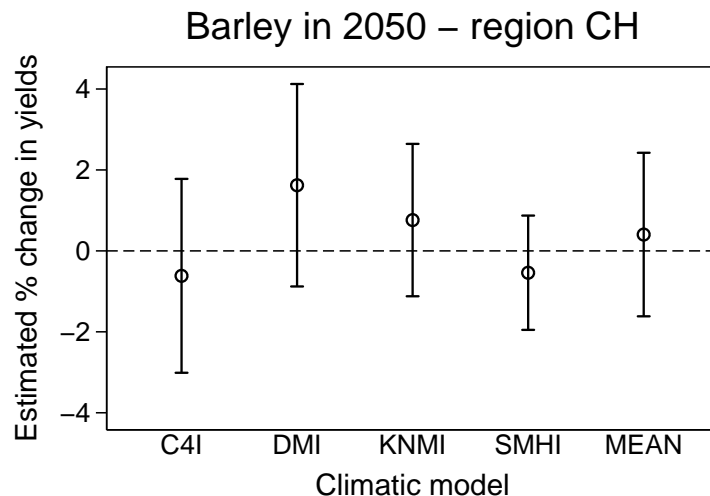


Figure 29 – Estimation de l'impact des changements climatiques sur le rendement de l'orge en Suisse à l'horizon 2050 par rapport à la période de référence 1961–1990 (effets via une modification des températures et des précipitations).

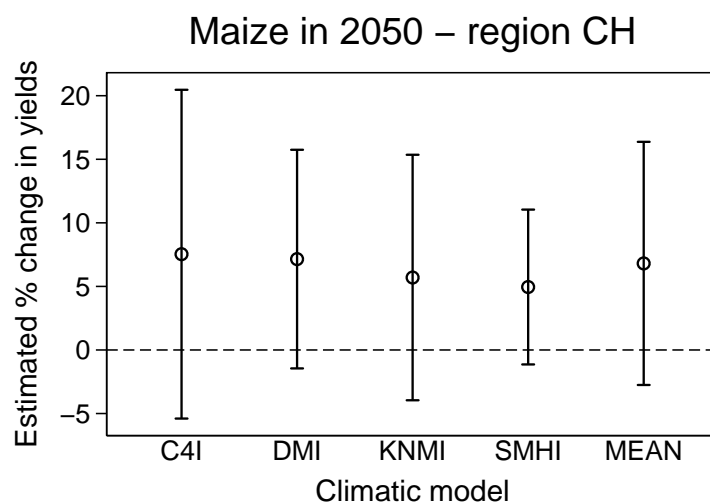


Figure 30 – Estimation de l'impact des changements climatiques sur le rendement du maïs grain en Suisse à l'horizon 2050 par rapport à la période de référence 1961–1990 (effets via une modification des températures et des précipitations).

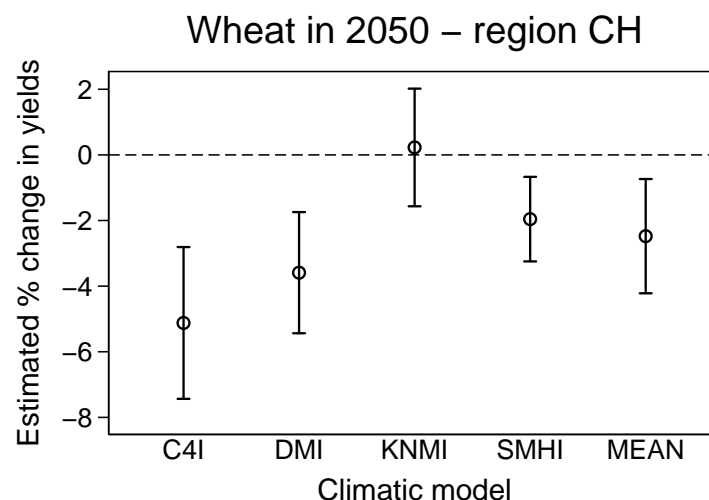


Figure 31 – Estimation de l’impact des changements climatiques sur le rendement du blé en Suisse à l’horizon 2050 par rapport à la période de référence 1961–1990 (effets via une modification des températures et des précipitations).

Pour au moins deux des trois cultures analysées, il est difficile de se prononcer sur les impacts des changements climatiques en 2050 car le signe même de ceux-ci n’est pas clairement déterminé par nos intervalles de confiance de 95%. C’est pour l’orge que l’effet du climat future semble le moins évident. Pour le maïs, une tendance vers un accroissement des rendements semble prévaloir bien qu’on ne puisse pas totalement rejeter l’hypothèse d’un effet nul voire négatif sur les rendements comme le montre la figure 30. Dans ce cas, une partie importante de l’incertitude provient de la difficulté que nous avons rencontré à identifier l’effet des précipitations sur les rendements du maïs (cf. tableau 54 de l’annexe C.1). En revanche, il semble établi que les changements climatiques auront un impact négatif sur les rendements du blé à l’horizon 2050. En gardant en tête que la marge d’erreur est importante, nous basons le reste de la discussion ci-dessous sur les valeurs des impacts calculées à partir de l’équation 7, et non plus sur les intervalles de confiance.

En ce qui concerne l’équation 7, il est important de noter qu’elle permet de calculer la variation de rendement lorsque les températures *et* les précipitations changent. Or, la structure de production que nous avons définie à la sous-section 3.4.2 nécessite que nous distinguions les deux effets. En effet, nous avons besoin de distinguer l’effet d’un changement des précipitations sur les rendements de celui d’un changement des températures afin d’impacter d’abord le facteur “Land” qui est substituable avec l’irrigation puis le bien composite “Irrigation-Land aggregate”. Les résultats obtenus en distinguant les effets de la température et des précipitations sont présentés dans le tableau 27 où nous résumons les paramètres et principaux résultats de l’analyse de l’impact des changements climatiques sur les rendements du blé, du maïs grain et de l’orge à l’horizon 2050⁴¹.

41. Les résultats à l’horizon 2090 sont présentés à l’annexe C.2.

Tableau 27 – Résultats de l’analyse de l’impact des changements climatiques en 2050 sur les rendements du blé, du maïs grain et de l’orge en distinguant les effets liés aux températures de ceux liés aux précipitations.

Climatic Model	Crop	Temperature (°C)		Precipitation (mm/month)		Yield impact of		
		T_{ref}^{\dagger}	ΔT^{\ddagger}	P_{ref}^{\dagger}	ΔP^{\ddagger}	Temp. %var	Prec. %var	Total %var
Model Mean	Wheat	10.4	1.7	130.9	-2.4	-3.0	0.5	-2.5
	Maize	12.0	1.7	124.7	-2.8	7.3	-0.4	6.8
	Barley	3.3	2.1	106.0	1.3	0.6	-0.2	0.4
C4I	Wheat	10.4	2.4	130.9	-0.5	-5.2	0.1	-5.1
	Maize	12.0	2.7	124.7	-3.8	8.2	-0.6	7.5
	Barley	3.3	2.7	106.0	4.9	0.3	-0.9	-0.6
DMI	Wheat	10.4	1.9	130.9	0.6	-3.5	-0.1	-3.6
	Maize	12.0	1.5	124.7	3.0	6.7	0.4	7.1
	Barley	3.3	2.3	106.0	-6.2	0.6	1.1	1.6
KNMI	Wheat	10.4	1.3	130.9	-10.2	-2.0	2.3	0.2
	Maize	12.0	1.7	124.7	-9.5	7.3	-1.5	5.7
	Barley	3.3	1.9	106.0	-0.3	0.7	0.1	0.8
SMHI	Wheat	10.4	1.2	130.9	0.5	-1.8	-0.1	-2.0
	Maize	12.0	1.0	124.7	-1.1	5.1	-0.2	5.0
	Barley	3.3	1.5	106.0	6.7	0.7	-1.3	-0.5

[†] Valeurs moyennes observées sur la période 1961–1990, calculées en utilisant la base de données de Lobell et al. [69].

[‡] ΔT et ΔP sont calculés à partir des données des modèles entre la période de référence 1961–1990 et 2050.

Ci-dessous sont présentés les impacts qui vont être simulés dans GEMINI-E3. Étant donné que le blé, le maïs grain et l’orge sont inclus dans le sous-secteur agricole “Other agricultural products”, le tableau 28 ne fournit des variations de rendements que pour celui-ci en distinguant cependant la part des variations liée aux changements de températures de celle liée aux changements des précipitations⁴²:

42. Selon la base de données GTAP 6, le blé représentait, en termes de valeur ajoutée en 2001, environ un tiers du sous-secteur “Other agricultural products” et le maïs/orge environ un quart. Par rapport à l’ensemble du secteur agricole (hors secteurs forestier et de la pêche), la part du blé était en 2001 de 4% et celle du maïs/orge de 3%.

Tableau 28 – Présentation des impacts des changements climatiques pour le secteur “Other agricultural products” en 2050 et 2090.

Scenario period	Climatic Model	Impact due to		
		Temp.	Prec.	Total
		%var	%var	%var
2050	Model Mean	-0.2	0.1	-0.1
	C4I	-0.9	-0.1	-1.0
	DMI	-0.4	0.1	-0.3
	KNMI	0.1	0.6	0.7
	SMHI	0	-0.2	-0.2
2090	Model Mean	-2.2	0.3	-2.0
	C4I	-5.9	0.5	-5.5
	DMI	-1.5	0.4	-1.1
	KNMI	-3.0	0.4	-2.7
	SMHI	-0.3	-0.3	-0.6

Il faut comprendre nos résultats obtenus à l’aide de modèles statistiques comme captant déjà une partie des bénéfices liés à l’adaptation. En effet, nos résultats reflètent également l’adaptation qui a lieu sur le court terme, principalement en avançant les dates d’ensemencement lors d’année chaude ou en augmentant l’apport d’eau via l’irrigation lors d’année sèche. A notre avis, ce lien qui existe entre apport d’eau pluviale et apport d’eau d’irrigation rend l’estimation de l’impact des précipitations sur les rendements particulièrement problématique. A défaut de pouvoir distinguer la production des terres irriguées de celle qui ne le sont pas, nous avons tenté de minimiser ce problème en choisissant les échantillons de pays les plus significatifs possibles pour la Suisse. Pour le maïs, nous avons ainsi exclu de l’échantillon les pays du sud de l’Europe qui font partie du quartile supérieur des pays avec les meilleurs rendements pour cette culture. En effet, ces pays présentent des hauts rendements probablement à cause d’un recours accru à l’irrigation. Ce faisant, nous réduisons toutefois l’information à disposition pour l’estimation et donc augmentons l’incertitude de nos estimations. De fait, il est peu probable que nos tentatives aient réussi à résoudre entièrement le problème d’identification. En raison de ce biais, nous avons décidé de simuler uniquement l’effet des températures sur les rendements⁴³. Enfin, nous limitons dans cette étude notre analyse aux scénarios climatiques C4I et KNMI, pour lesquels les impacts des changements climatiques sur les rendements sont respectivement les plus néfastes et les plus bénéfiques, ainsi qu’au modèle moyen.

9.2.2 Irrigation et variations des ressources en eau brute

Comme expliqué dans la section 3.4.2, la structure de production des secteurs agricoles permet aux secteurs de production végétale de substituer du facteur terre, qui contient la valeur intrinsèque des précipitations, par de l’irrigation si par exemple le rendement de la terre di-

43. Un autre problème avec les précipitations est qu’elles sont mesurées par des valeurs moyennes sans indication de leur distribution durant la période de croissance des cultures. Or, cette distribution compte peut-être plus pour les rendements que la valeur moyenne. On remarque d’ailleurs que les résultats les plus précis sont obtenus pour le blé qui est la culture pour laquelle les données des variables climatiques sont moyennées sur la plus petite période de l’année (5 mois).

minue à cause des changements climatiques. Cette modélisation permet de prendre en compte l'irrigation comme possible stratégie d'adaptation dans ces secteurs. Dès lors, la disponibilité d'eau pour irriguer constitue une contrainte supplémentaire. Or les changements climatiques vont probablement diminuer les ressources en eau disponibles pendant la période de croissance des plantes. C'est pourquoi aux impacts décrits précédemment s'ajoute un impact sur la ressource en eau brute, utilisée soit directement, soit indirectement en cas d'emploi d'eau potable, pour l'irrigation des cultures. Les impacts des changements climatiques sur les ressources en eau brute sont décrits en détails dans la section 9.1.1.

Dans cette section, nous utilisons par souci de cohérence les mêmes scénarios climatiques pour impacter l'eau que pour impacter les rendements. Plus particulièrement, nous avons retenu les deux scénarios les plus extrêmes, C4I et KNMI, ainsi que le scénario qui représente la moyenne des scénarios C4I, KNMI, DMI et SMHI.

Tableau 29 – Impacts des changements climatiques sur la ressource en eau, variation en 2050.

	Eau brute	Irrigation
C4I	-0.2%	-15.0%
KNMI	-0.9%	-12.8%
Scénario moyen	-1.3%	-10.8%

9.2.3 Impacts économiques pour le secteur agricole

Dans cette sous-section, nous présentons les résultats fournis par le modèle GEMINI-E3 lorsque les variations de rendements suite à l'évolution de température ainsi que les variations d'eau brute disponible pour la Suisse en 2050 sont prises en considération. L'impact des changements climatiques est simulé d'après les 3 différents scénarios climatiques décrits dans la section précédente. Pour chacun de ces scénarios, nous impactons tout d'abord uniquement la disponibilité de l'eau brute, puis seulement les rendements d'après les variations de température. Finalement, les effets sur les rendements et l'eau sont simulés conjointement.

Le tableau 30 présente les résultats des simulations des différents scénarios. Tout d'abord, Mean, C4I et KNMI Eau montrent l'impact pour les secteurs agricoles d'une diminution de l'eau brute disponible pour 3 scénarios climatiques alternatifs. Notons que Mean Eau est identique au scénario 4 simulé dans la section 9.1.2 sur l'impact économique de variations de la disponibilité en eau brute. En revanche, nous analysons ici plus particulièrement les effets observés dans les secteurs agricoles. Enfin, le dernier scénario simule l'impact d'un subventionnement de l'irrigation et sera discuté à la fin de cette section.

Globalement, la restriction de la ressource en eau entraîne pour l'ensemble de l'économie suisse des pertes de surplus de 14 à 17.7 millions de CHF₂₀₁₀ par rapport au compte de référence sans l'application de mesure exogène d'adaptation selon le scénario climatique envisagé. La production totale des 5 secteurs agricoles ne diminue quant à elle que de 0.1 à 0.17%. Pourtant, les prix de l'eau d'irrigation augmentent fortement en termes relatifs : on observe une hausse de 38 à 61% du prix par rapport au compte de référence. Les conséquences limitées de la forte hausse du prix de cet input s'expliquent par la très faible valeur attribuée à l'eau brute en 2001 et dans le compte de référence. Les secteurs agricoles les plus touchés par la diminution de la disponibilité des ressources en eau sont sans surprise les cultures maraîchères et fourragères ainsi que les autres produits agricoles. En effet, ces derniers irriguent une partie des cultures et ce surtout au printemps et en été, période pendant laquelle la diminution des ressources en eau brute est plus

forte qu'en moyenne annuelle. Mais les baisses de production demeurent faibles même dans ces secteurs: les cultures maraîchères, secteur le plus touché en termes relatifs, voient leur production reculer entre 0.54 et 0.84% selon le scénario climatique. L'augmentation des prix de production est également faible, elle se situe entre 0.26 et 0.41% pour les cultures maraîchères. Enfin la terre, attribuée de manière fixe aux différents usages, perd également de la valeur lorsqu'on limite les ressources en eau brute disponibles, et ce pour tous les secteurs.

Ensuite, les scénarios Mean, C4I et KNMI Température retracent les conséquences de variations de la température pour les différents scénarios climatiques. Rappelons que dans le modèle, seul le secteur des autres produits agricoles est directement impacté par ces variations, faute de données sur les impacts des changements climatiques sur les rendements des autres secteurs (cf. sous-section 9.2.1). On remarque tout d'abord que les conséquences globales pour l'économie suisse sont incertaines. Négatives pour les scénarios climatiques moyens et C4I, les variations de surplus sont positives pour KNMI, scénario dans lequel l'évolution des températures sera bénéfique au rendement des cultures. De même, la production agricole totale évolue de + 0.01% à -0.06% selon les scénarios climatiques. Les impacts sectoriels sont faibles, les conséquences les plus prononcées se retrouvent dans les autres produits agricoles, impactés directement, pour lesquels les prix de production varient entre +0.27 et -0.03%. Les prix de l'eau d'irrigation diminuent très légèrement dans les scénarios mean et C4i, qui prédisent un impact négatif de l'évolution des températures sur les rendements en 2050. Ceci s'explique par les diminutions de la production agricole, pour laquelle l'eau est un input. Cette baisse des prix de l'eau provoque une augmentation relative de l'utilisation d'eau d'irrigation dans la production de tous les secteurs d'agriculture végétale. Enfin, notons que l'impact sur le prix des terres allouées à la production des autres produits agricoles est positif dans les deux scénarios qui supposent un impact négatif sur le rendement et négatif dans le cas contraire. En effet, une augmentation de rendement de la terre est modélisée dans GEMINI-E3 comme un accroissement des terres disponibles, qui se traduit par une diminution de prix de cette dernière et vice-versa.

Tableau 30 – Résultats des simulations pour l'agriculture.

	Mean			C4i			KNMI			Mean + subvention		
	Eau	Température	Total	Eau	Température	Total	Eau	Température	Total	Eau	Température	Total
Production												
Crop	-0.24%	0.00%	-0.24%	-0.38%	0.00%	-0.38%	-0.31%	0.00%	-0.31%	-0.20%	0.00%	-0.20%
Milk	0.00%	0.00%	-0.01%	-0.01%	-0.01%	-0.02%	-0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Animal product	-0.01%	0.00%	-0.01%	-0.01%	-0.01%	-0.02%	-0.01%	0.00%	-0.01%	0.00%	0.00%	-0.01%
Vegetables	-0.54%	0.00%	-0.54%	-0.84%	0.00%	-0.83%	-0.67%	0.00%	-0.67%	-0.44%	0.00%	-0.44%
Other agricultural products	-0.28%	-0.08%	-0.36%	-0.42%	-0.38%	-0.80%	-0.34%	0.04%	-0.30%	-0.23%	-0.08%	-0.31%
Total	-0.10%	-0.01%	-0.12%	-0.17%	-0.06%	-0.22%	-0.13%	0.01%	-0.13%	-0.09%	-0.01%	-0.10%
Prix de production												
Crop	0.13%	0.00%	0.13%	0.20%	0.00%	0.19%	0.16%	0.00%	0.16%	0.10%	0.00%	0.10%
Milk	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Animal product	0.00%	0.00%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Vegetables	0.26%	0.00%	0.26%	0.41%	0.00%	0.41%	0.33%	0.00%	0.33%	0.22%	0.00%	0.22%
Other agricultural products	0.20%	0.06%	0.26%	0.31%	0.27%	0.58%	0.25%	-0.03%	0.22%	0.17%	0.06%	0.23%
Total	0.06%	0.01%	0.06%	0.09%	0.04%	0.12%	0.07%	0.00%	0.07%	0.05%	0.01%	0.05%
Consommation d'eau brute												
Crop	-11.29%	0.02%	-11.28%	-15.70%	0.07%	-15.64%	-13.39%	-0.01%	-13.40%	-11.23%	0.02%	-11.22%
Milk	-0.67%	0.00%	-0.67%	-0.10%	0.00%	-0.10%	-0.46%	0.00%	-0.46%	-0.67%	0.00%	-0.67%
Animal product	-0.67%	0.00%	-0.67%	-0.10%	0.00%	-0.10%	-0.46%	0.00%	-0.46%	-0.67%	0.00%	-0.67%
Vegetables	-11.49%	0.02%	-11.47%	-15.98%	0.08%	-15.91%	-13.63%	-0.01%	-13.64%	-11.38%	0.02%	-11.37%
Other agricultural products	-9.81%	-0.03%	-9.84%	-13.60%	-0.12%	-13.70%	-11.61%	0.01%	-11.60%	-9.96%	-0.03%	-9.98%
Total	38.20%	0.00%	38.13%	61%	0.00%	60.62%	48.4%	0.00%	48.44%	31.32%	0.00%	31.25%
Prix eau irrigation												
Prix de la terre												
Crop	-0.49%	0.00%	-0.50%	-0.79%	-0.01%	-0.80%	-0.63%	0.00%	-0.63%	-0.40%	0.00%	-0.41%
Milk	-0.09%	-0.01%	-0.10%	-0.06%	-0.04%	-0.09%	-0.08%	0.00%	-0.07%	-0.08%	-0.01%	-0.09%
Animal product	-0.13%	-0.01%	-0.14%	-0.07%	-0.05%	-0.12%	-0.11%	0.01%	-0.11%	-0.13%	-0.01%	-0.14%
Vegetables	-1.19%	0.00%	-1.18%	-1.86%	0.01%	-1.85%	-1.49%	0.00%	-1.49%	-0.98%	0.00%	-0.98%
Other agricultural products	-0.44%	0.33%	-0.11%	-0.69%	1.50%	0.80%	-0.55%	-0.17%	-0.72%	-0.36%	0.33%	-0.03%
Surplus en Mios CHF 2010												
Coûts directs en Mios CHF 2010	-14	-1.0	-15.2	-17.7	-3.5	-21.2	-15.7	0.4	-15.3	-13.6	-1.0	-14.5
			5.5			3.8			3.6			5.5
Subvention en Mios CHF 2010												
												18.01

* en écart en pourcentage par rapport au compte de référence

Les scénarios Mean, C4I et KNMI Total illustrent l'impact total (variation des températures et diminution de l'eau brute disponible) des changements climatiques sur les secteurs. L'impact économique global est négatif et plutôt faible, le surplus varie entre -15.2 pour le scénario Mean Total et -21.2 millions de CHF₂₀₁₀ dans le scénario C4I. Les coûts unitaires de production augmentent, ce qui provoque pour le scénario mean une hausse des coûts de production totaux de 20.6 millions de CHF₂₀₁₀ au niveau de production du scénario mean. La production diminue faiblement dans tous les secteurs agricoles, et la production du secteur de cultures maraîchères est la plus touchée en termes relatifs, avec une diminution de 0.54 à 0.83% par rapport au compte de référence selon les scénarios climatiques. Les impacts sur le prix de l'eau d'irrigation sont importants et se situent entre +38 et +61% par rapport au compte de référence sans changements climatiques. Enfin, les coûts directs, définis comme la perte de ressources d'eau et de terre en 2050 suite aux changements climatiques évaluée aux prix du compte de référence, sont très bas et inférieurs aux pertes de bien-être. Tout comme dans la section 9.1.2, les faibles valeurs des ressources en eau et la difficulté de les substituer constituent les principales explications de ces résultats.

Finalement, le dernier scénario applique une subvention à l'irrigation comme mesure exogène d'adaptation avec le scénario climatique Mean. Cette subvention se monte à 50% du prix de production des "autres facteurs de production", soit de la combinaison de l'énergie et du capital nécessaire à l'extraction d'eau brute pour l'irrigation. Cette mesure entraîne une augmentation de la demande d'eau brute pour l'irrigation qui résulte en une hausse du prix de cette dernière par rapport au compte de référence plus importante que dans le scénario Mean sans subvention. En revanche, la hausse de prix de l'eau d'irrigation, combinaison de l'eau brute ainsi que de l'énergie et du capital nécessaires à son extraction, est moins importante lorsque la subvention est appliquée (+38.13% dans le scénario Mean versus + 31.25% dans le scénario Mean + subvention). L'application d'une subvention atténue très légèrement les baisses de production et les augmentations de prix de production engendrées par les changements climatiques. Au total, le montant déboursé pour le subventionnement de l'irrigation s'élève à 18 millions de CHF₂₀₁₀. Globalement, la subvention a un faible impact positif sur le bien-être, puisque la perte de bien-être passe de 15.2 millions de CHF₂₀₁₀ dans le scénario Mean à 14.5 millions de CHF₂₀₁₀ dans le scénario Mean + subvention.

9.3 Impacts des changements climatiques sur la consommation d'énergie

Résumé:

La consommation d'énergie pour le chauffage diminue fortement jusqu'en 2050. Les besoins de climatisation quant à eux augmentent, mais cette hausse entraîne des effets économiques bien plus faibles que la baisse des besoins énergétiques pour le chauffage. Ainsi les conséquences économiques globales sont positives et très élevées pour la Suisse et les émissions de CO₂ diminuent par rapport à la baseline.

9.3.1 Méthode des degrés-jours et évaluation de la demande d'énergie

La demande d'énergie pour le chauffage

Afin de pouvoir introduire une baisse des besoins de chauffage dans le modèle, il est nécessaire de connaître la part d'énergie qui est utilisée à des fins de chauffage dans les différents secteurs de l'économie suisse. Le tableau 31 fournit cette information pour les ménages privés alors que les tableaux 32 et 33 la fournissent pour les secteurs "Services et agriculture" et "Industrie". Dans chacun de ces trois tableaux, la valeur totale d'une colonne indique la consommation finale d'énergie en 2001 par type d'usage alors que la valeur totale d'une ligne indique la consommation finale d'énergie en 2001 par type d'agents énergétiques.

Tableau 31 – Consommation finale d'énergie des ménages privés en 2001 pour différents usages et selon différents systèmes et agents énergétiques (en PJ). (Source: [61])

	Chauffage	Eau chaude	Cuisine	Autres	Total
Mazout	115.7 (87.8%)	16.1 (12.2%)	0 (0%)	0 (0%)	131.8 (100%)
Gaz naturel	30.9 (84.4%)	5.1 (13.9%)	0.6 (1.7%)	0 (0%)	36.6 (100%)
Electricité ¹	11.0 (19.5%)	8.3 (14.7%)	8.1 (14.4%)	29.0 (51.4%)	56.4 (100%)
Bois	16.8 (93.3%)	1.0 (5.6%)	0.2 (1.1%)	0 (0%)	18.0 (100%)
Charbon	0.4 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0.4 (100%)
Chauffage à distance	4.9 (84.5%)	0.9 (15.5%)	0 (0%)	0 (0%)	5.8 (100%)
Chaleur ambiante	3.2 (91.4%)	0.3 (8.6%)	0 (0%)	0 (0%)	3.5 (100%)
Solaire	0.1 (33.3%)	0.2 (66.7%)	0 (0%)	0 (0%)	0.3 (100%)
Total	183.0 (72.4%)	31.9 (12.6%)	8.9 (3.5%)	29.0 (11.5%)	252.8 (100%)

¹ Y compris l'électricité consommée par les pompes à chaleur.

Tableau 32 – Consommation finale d'énergie du secteur "Services et agriculture" en 2001 pour le chauffage (en PJ). (Source: [61])

	Chauffage	Autres	Total
Combustibles fossiles	77.4 (87.8%)	10.9 (12.2%)	88.3 (100%)
Electricité	4.1 (6.8%)	55.8 (93.2%)	59.9 (100%)
Total	81.5 (55.0%)	66.7 (45.0%)	148.2 (100%)

Tableau 33 – Consommation finale d’énergie du secteur “Industrie” en 2001 pour le chauffage (en PJ). (Source: [61])

	Chauffage	Autres	Total
Combustibles fossiles	24.3 (23.2%)	80.4 (76.8%)	104.7 (100%)
Electricité	0.1 (0.2%)	66.0 (99.8%)	66.1 (100%)
Total	24.5 (14.4%)	146.2 (85.6%)	170.7 (100%)

Comme nous pouvons le constater à partir des trois tableaux précédents, ce sont les ménages privés qui consomment le plus d’énergie pour le chauffage. En termes relatifs, le chauffage représente environ 70% de leur consommation totale d’énergie contre encore 55% pour le secteur “Services et agriculture” et seulement 15% pour l’industrie. Comme les combustibles fossiles (mazout, gaz naturel et charbon) sont la source principale d’énergie pour se chauffer, la part du chauffage dans la consommation totale d’énergie fossile est encore plus importante, de plus de 85% pour les ménages privés et le secteur “Services et agriculture” et de près de 25% pour l’industrie.

La sensibilité de la demande d’électricité aux degrés-jours a été étudiée empiriquement dans différentes études [17, 33]. D’autres études ont utilisé la méthode des degrés-jours afin d’estimer les besoins futurs en énergie de chauffage [27, 58, 92]. Pour le chauffage, cette méthode consiste à calculer le nombre de degrés qui sont en quelque sorte perdus et qui doivent être compensés afin d’assurer un certain niveau de confort thermique à l’intérieur des bâtiments. On appelle cette quantité les “heating degree-days” (HDD). Nous les calculons à partir de la formule standard de la SIA:

$$HDD(\theta_i, \theta_{th}) = \sum_{k=1}^{365} m_k \cdot (\theta_i - \theta_{e,k}) \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{avec } m_k &= 1 & \text{si } \theta_{e,k} &\leq \theta_{th} \\ m_k &= 0 & \text{si } \theta_{e,k} &> \theta_{th} \end{aligned}$$

θ_i : température intérieure
 $\theta_{e,k}$: température extérieure moyenne du jour k
 θ_{th} : température de seuil en-dessous de laquelle le chauffage est nécessaire

Dans cette formule, les HDD sont comptabilisés dès que la température journalière extérieure moyenne ($\theta_{e,k}$) est inférieure à un seuil fixé en fonction du niveau d’isolation des bâtiments (θ_{th}). Plus les bâtiments sont isolés et plus la valeur de ce θ_{th} sera petite. Les HDD sont alors calculés comme la différence entre la température intérieure (θ_i) et la température journalière extérieure moyenne. Concernant les valeurs des paramètres θ_i et θ_{th} pour la Suisse, nous prenons celles qui sont utilisées dans [27], à savoir une valeur de 20°C pour θ_i et une valeur de θ_{th} qui satisfasse $\theta_{th} \in \{8, 10, 12^\circ\text{C}\}$. Nous faisons l’hypothèse que la consommation d’énergie des secteurs résidentiel, industriel et tertiaire en 2050 pour le chauffage est celle d’un parc de bâtiments avec un niveau moyen d’isolation correspondant à un $\theta_{th} = 10^\circ\text{C}$.

En nous inspirant de Christenson et al. [27], nous faisons l’hypothèse que la demande d’énergie pour chauffer les bâtiments est proportionnelle à la valeur des HDD. Cela nous permettra d’estimer directement la baisse ex-ante de cette demande à partir d’une baisse des HDD.

Une méthode alternative aux degrés-jours consiste à utiliser les résultats de Hofer [52] qui a calculé, pour la Suisse et jusqu’en 2035, des facteurs de correction pour la demande d’énergie de chauffage qui prennent en compte les hausses des températures et de la radiation induites par les changements climatiques. Toutefois, nous lui préférons la méthode des degrés-jours car celle-ci nous permet de nous baser sur les données d’ENSEMBLES qui seront également utilisées pour évaluer les autres impacts des changements climatiques et qui disposent d’un horizon de temps mieux adapté à nos recherches.

La demande d’énergie pour l’air conditionné

La méthode des degrés-jours peut aussi être utilisée dans le but de calculer les besoins énergétiques pour l’air conditionné. Dans ce cas, on parle de “cooling degree-days” (CDD). Toutefois, il ne semble pas y avoir de standard suisse ni européen afin de les calculer. Pour cette raison, nous utiliserons la définition fournie par l’ASHRAE ⁴⁴[56] donnée ci-dessous:

$$CDD(\theta_{bp}) = \sum_{k=1}^{365} m_k \cdot (\theta_{e,k} - \theta_{bp}) \quad (9)$$

avec $m_k = 1$ si $\theta_{e,k} \geq \theta_{bp}$
 $m_k = 0$ si $\theta_{e,k} < \theta_{bp}$

$\theta_{e,k}$: température extérieure moyenne du jour k
 θ_{bp} : température de seuil en-dessus de laquelle l’air conditionné est nécessaire

L’esprit de la formule 9 est très proche de celui de la formule 8. Les degrés en excès sont calculés dès lors que la température journalière extérieure moyenne ($\theta_{e,k}$) dépasse un certain seuil (θ_{bp}). Ce seuil est un paramètre propre à la formule 9 qui indique la température extérieure à partir de laquelle l’air conditionné est nécessaire pour rétablir la température intérieure au niveau de confort souhaité (ce paramètre est appelé le “balance point temperature” dans le jargon technique). Dans Christenson et al. [27], les valeurs utilisées de θ_{bp} sont égales à 18.3, 20 et 22°C. A défaut de valeurs standards pour la Suisse, nous calculons les CDD avec le seuil de 18.3°C ⁴⁵.

Le lien entre les CDD et la demande d’énergie pour l’air conditionné est plus compliqué que celui entre les HDD et la demande d’énergie pour le chauffage dont il a été question précédemment. Si les propriétés d’un bâtiment restent constantes au cours du temps alors l’hypothèse peut également être faite, selon [27], que la demande d’énergie pour l’air conditionné est proportionnelle à la valeur des CDD. Concrètement, le fait de garder les propriétés d’un bâtiment

44. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

45. La valeur de 18.3°C correspond à une “ASHRAE standard numerical value” et est également utilisée dans [61]. A noter enfin que les CDD calculés pour la période de référence sans changement climatique sont proches de zéro lorsqu’on utilise un seuil plus élevé que 18.3°C alors même que la consommation d’énergie pour la climatisation n’était pas égale à zéro durant cette période.

constantes signifie que la méthode ne permet pas de prendre en compte la possibilité de retarder l'utilisation de l'air conditionné à travers diverses mesures telles que l'ouverture des fenêtres. Dans leur étude sur l'impact des changements climatiques sur la consommation d'énergie des bâtiments du secteur tertiaire, Aebischer et al. [9] utilisent une relation empirique linéaire entre la demande spécifique d'électricité pour l'air conditionné ($KWh/m_c^2 \cdot year$ où m_c^2 est la surface totalement climatisée) et les CDD. Cette relation, estimée pour les bâtiments contenant des bureaux climatisés, est la suivante⁴⁶:

$$D_{spec.} = 12.7 + 0.103 \cdot CDD \quad (10)$$

Dans ce cas, on voit que la variation de la demande spécifique d'énergie pour l'air conditionné sera plus faible que la variation des CDD. Il faut aussi remarquer que la consommation spécifique sera plus petite pour les surfaces qui ne sont que partiellement climatisées. En comparaison des surfaces totalement climatisées, la consommation spécifique semble être environ 4 fois plus petite si l'on se réfère aux données fournies dans [9].

Un autre élément qui rend les choses plus complexes avec l'air conditionné est le fait que la proportion des surfaces climatisées augmente et que cette tendance va se renforcer avec les changements climatiques. Dans leur baseline sans changement climatique, Aebischer et al. [9] proposent les évolutions suivantes de ces surfaces pour le secteur tertiaire:

Tableau 34 – Pourcentages de la surface de sol chauffé du secteur tertiaire partiellement ou totalement climatisés dans un scénario sans changements climatiques. (Source: [9])

	2000	2005	2015	2025	2035	2050 ¹
not cooled	61%	59%	54%	49%	44%	36%
partially cooled	20%	22%	25%	27%	30%	36%
fully cooled	19%	19%	21%	23%	25%	28%

¹ Les valeurs de cette colonne proviennent d'extrapolations que nous avons effectuées et ne sont pas fournies dans [9].

Dans leur variante avec changement climatique, Aebischer et al. [9] font croître la surface climatisée sur la base des hypothèses suivantes : “...by 2035 half of the spaces that appear as non-cooled under the variant no climate change will be partially air-conditioned. Further, we estimate that half of the partially air conditioned spaces under the variant no climate change will be fully so by 2035”. En appliquant ces règles aux valeurs de la dernière colonne du tableau 34, nous obtenons une valeur de 36% pour les surfaces qui sont partiellement climatisées et une valeur de 46% pour les surfaces totalement climatisées. Ces valeurs ne peuvent évidemment pas être utilisées sans indication de la surface totale des bâtiments du secteur tertiaire que nous avons estimé à environ 60 millions de m^2 en 2000. Si la surface croît au même rythme que le secteur tertiaire lui-même alors la surface totale des bâtiments sera égale dans la baseline à environ 114 millions de m^2 en 2050.

En comparaison, la surface occupée par les logements du secteur résidentiel était bien plus grande en l'an 2000, de l'ordre de 250 millions de m^2 . Toutefois, le taux d'équipement du secteur résidentiel est bien moindre que pour le secteur tertiaire. En se basant sur une valeur annuelle

46. Ci-dessous, nous ferons l'hypothèse que cette relation est valable quelque soit le type de bâtiments et d'activités du secteur tertiaire.

de consommation des ménages privés de 0.1 PJ pour la climatisation (cf. [61]), nous déduisons que le pourcentage de surface climatisée dans le secteur résidentiel était de 0.6% en 2000. En 2050, nous prévoyons que la surface occupée par les logements sera d'environ 475 millions de m^2 avec un taux d'équipement pouvant varier de 2% à 10%.

Le progrès technologique joue évidemment aussi un rôle dans le calcul de la demande d'énergie pour la climatisation. En nous basant une nouvelle fois sur [9], nous faisons l'hypothèse d'un progrès technologique exogène qui engendre une baisse annuelle de 0.5% de la consommation spécifique d'électricité pour la climatisation.

9.3.2 Evolution des HDD et des CDD

Pour déterminer l'évolution des HDD et des CDD, nous nous basons sur les données d'ENSEMBLES sur les températures moyennes journalières. Nous utilisons les équations 8 et 9 pour calculer respectivement les HDD et les CDD, d'abord pour notre période de référence 1961–1990 et ensuite pour chaque décennie jusqu'en 2050. Comme ce calcul s'effectue aux 176 points de la maille des modèles d'ENSEMBLES situés sur le territoire suisse, nous devons trouver un moyen d'agréger ces 176 valeurs afin de ne plus en avoir qu'une seule par période de scénario. Idéalement, nous aurions aimé pondérer les valeurs calculées aux différents points de la maille avec des données sur la surface énergétique de référence. Toutefois, nos recherches ne nous ont pas permis de trouver cette information à un degré suffisamment désagrégué. C'est la raison pour laquelle nous nous sommes rabattus sur deux autres indicateurs que sont la surface des logements ainsi que la population résidente. Les poids obtenus pour les 176 points de la maille des modèles d'ENSEMBLES que nous avons utilisés sont présentés aux figures 32 et 33.

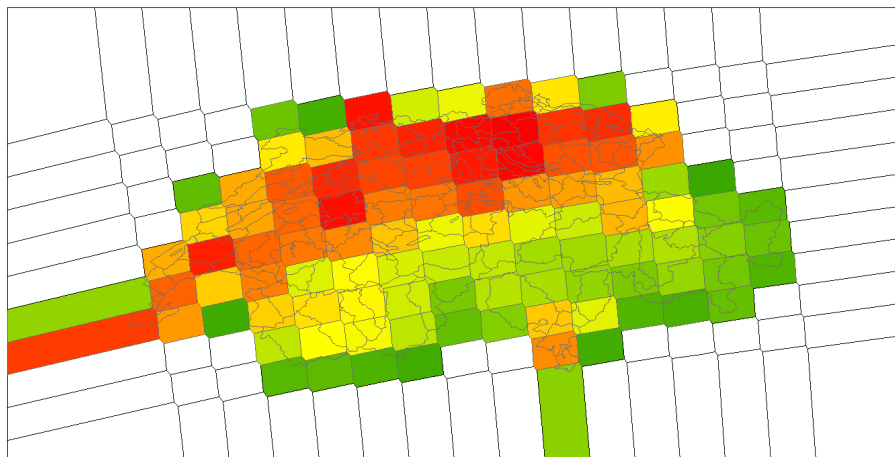


Figure 32 – Poids obtenus à partir des données de la surface des logements récoltées lors du recensement fédéral de la population de 2000. (Source: OFS)

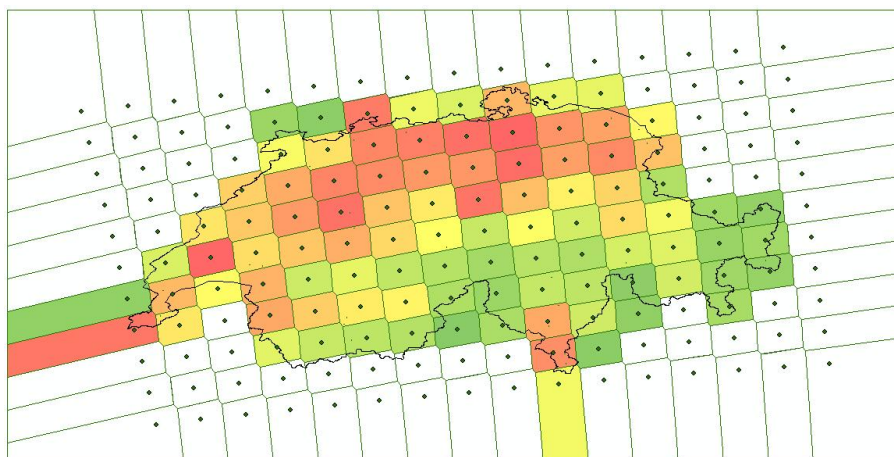


Figure 33 – Poids obtenus à partir des données de la population résidente récoltées lors du recensement fédéral de la population de 2000. (Source: OFS)

Comme nous pouvons le voir, ces deux jeux de poids sont très similaires. Par conséquent, ils donnent des résultats pratiquement identiques concernant l'évolution des HDD et des CDD. Les évolutions que nous allons détailler ci-dessous se basent sur le jeu de poids obtenu à l'aide des données de population⁴⁷. En utilisant les résultats de cinq scénarios climatiques, la figure 34 présente la manière dont les HDD évoluent de la période de référence 1961–1990 à 2050:

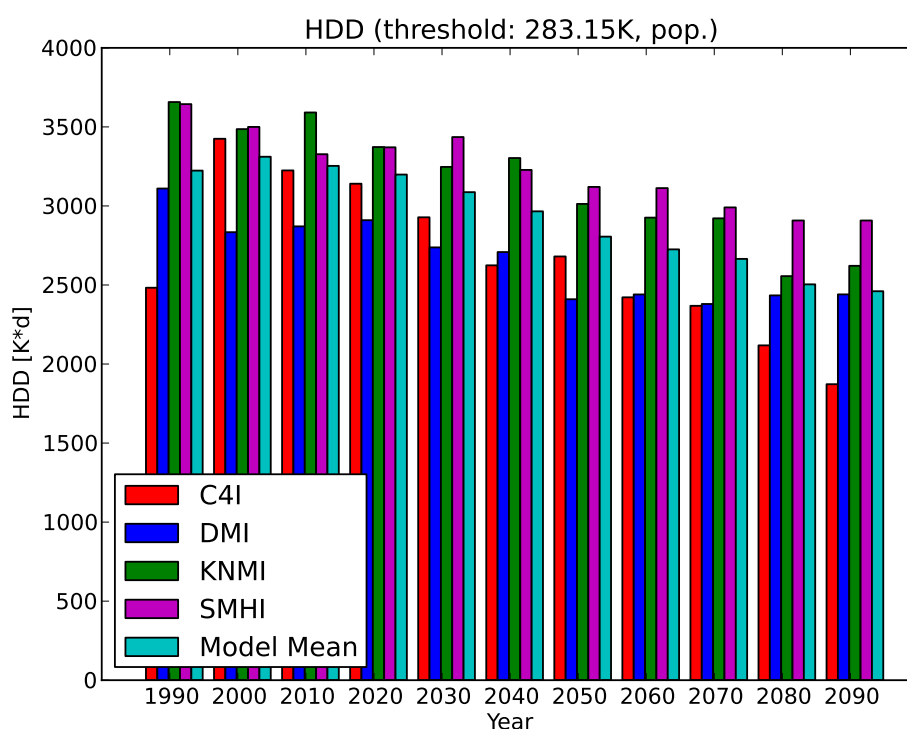


Figure 34 – Evolution de 1990 jusqu'en 2050 des HDD calculés sur une base annuelle avec $\theta_{th} = 10^\circ\text{C}$.

En résumé, le tableau 35 donne les variations estimées des HDD entre la période de base 1961–1990 et 2050 pour le scénario “Model Mean” et différents seuils θ_{th} .

47. Nous faisons l'hypothèse que ces poids restent constants jusqu'en 2050.

Tableau 35 – Variation des HDD entre la période de référence 1961-1990 et 2050.

Threshold	$(\Delta_{2050}/HDD_{ref})^*$
$\theta_{th} = 8^\circ\text{C}$	-18.1%
$\theta_{th} = 10^\circ\text{C}$	-14.6%
$\theta_{th} = 12^\circ\text{C}$	-12.9%

*reference period : 1961-1990

Lorsqu'on utilise des seuils θ_{th} différents, la variation des HDD change. La variation qui est calculée avec $\theta_{th} = 12^\circ\text{C}$ est environ 30% plus petite que celle calculée avec $\theta_{th} = 8^\circ\text{C}$. C'est principalement un effet de base qui explique ces changements au niveau du pourcentage de variation dans la mesure où la valeur initiale des HDD baisse lorsque le seuil θ_{th} baisse (ce qui correspond à des niveaux plus élevés d'isolation).

La prochaine figure présente la manière dont les CDD évoluent de la période de référence 1961–1990 à 2050:

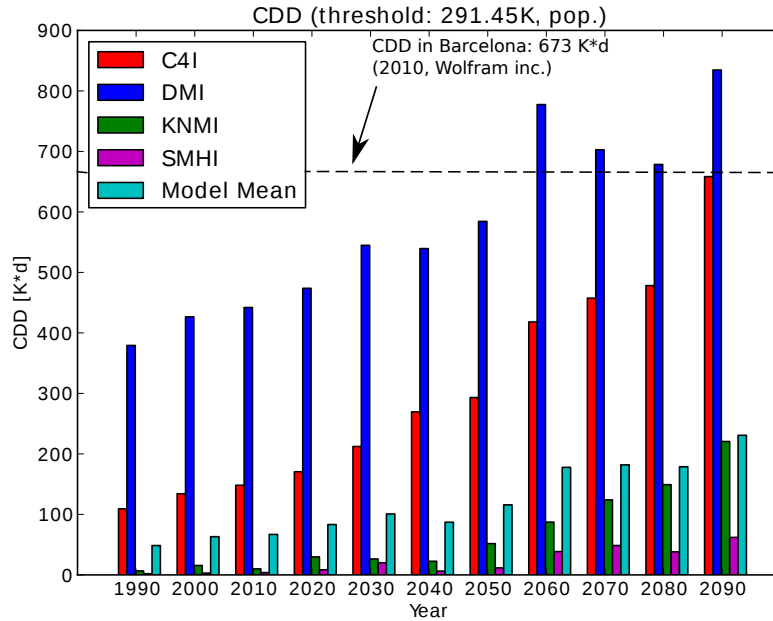


Figure 35 – Evolution de 1990 jusqu'en 2050 des CDD calculés sur une base annuelle avec $\theta_{bp} = 18.3^\circ\text{C}$.

On note une grande disparité entre les modèles au niveau des valeurs des CDD. En particulier, le modèle DMI fournit des valeurs très élevées pour les CDD: la valeur de l'indice calculée pour la période de référence est proche de celle calculée dans [61] pour l'année 2003 (=346). Toutefois, on note que même la valeur des CDD basée sur le modèle DMI n'atteint pas encore en 2050 les valeurs que l'on peut rencontrer actuellement autour du bassin méditerranéen ou dans la péninsule ibérique. On en est même très loin en prenant le scénario climatique basé sur la moyenne des quatre modèles d'ENSEMBLES (i.e. la valeur des CDD est de 115.8 en 2050 pour le "Model Mean").

En résumé, le tableau 36 donne la variation estimée des CDD entre la période de base 1961–1990 et 2050 pour le scénario "Model Mean" et pour un seuil $\theta_{bp} = 18.3^\circ\text{C}$.

Tableau 36 – Variation des CDD entre la période de référence 1961-1990 et 2050.

Threshold	$(\Delta_{2050}/CDD_{ref})^*$
$\theta_{bp} = 18.3^\circ\text{C}$	+138.5%

* reference period : 1961-1990

9.3.3 Impacts économiques des nouveaux besoins de chauffage et de climatisation

Dans cette sous-section, nous estimons l’impact économique des besoins de chauffage et de climatisation en 2050 lorsque ceux-ci sont réévalués afin de tenir compte de la hausse future des températures. Comme présenté ci-dessus, notre méthode se base sur les HDD et les CDD c’est-à-dire sur des indices ad hoc qui permettent de calculer l’évolution future de la consommation d’énergie pour le chauffage et la climatisation. En 2050, les évolutions de ces deux indices sont contrastées: de -18.1% à -12.9% selon le seuil θ_{th} utilisé pour calculer les HDD et +138.5% pour les CDD lorsqu’un seuil $\theta_{bp} = 18.3^\circ\text{C}$ est utilisé. Pour le chauffage, nous faisons l’hypothèse que la baisse de la demande d’énergie en 2050 par rapport à la baseline est équivalente à la baisse des HDD. Pour la climatisation, nous avons estimé une hausse de la consommation d’électricité en 2050 par rapport à la baseline de 0.6 TWh dans le secteur des services et de 0.1 à 0.8 TWh dans le secteur résidentiel. Comme décrit dans la sous-section précédente, il faut également remarquer que la variante avec changements climatiques pour la climatisation implique, tant de la part des ménages que du secteur tertiaire, une augmentation des dépenses d’équipements par rapport à la baseline qui sont supposées ici nulles. Cette augmentation doit avoir en soi des effets d’équilibre général qui ne sont cependant pas inclus dans les simulations présentées ci-dessous.

Ces effets ont été introduits de façon séquentielle dans le modèle afin de distinguer les différents impacts. Cette approche nous permet ainsi de déterminer la contribution de chacun de ces effets à l’impact global de la variation des besoins d’énergie pour le chauffage et la climatisation. Sauf en cas de mention contraire, nous simulons ci-dessous une baisse de la demande d’énergie pour le chauffage de -14.6% (cas médian qui correspond à l’utilisation d’un seuil $\theta_{th} = 10^\circ\text{C}$)⁴⁸. Pour les besoins futurs d’énergie pour la climatisation, nos simulations de base tablent sur une hausse de 0.4 TWh pour le secteur résidentiel et de 0.6 TWh pour le secteur tertiaire en 2050 par rapport à la baseline. Nous testons aussi une variante où la hausse de la demande d’énergie des ménages pour la climatisation augmente de 0.8 TWh. Ci-dessous, nous utilisons le terme d’“hypothèse haute” pour nous référer à cette variante. En tout, nous avons réalisé 12 scénarios retraçant successivement:

- La baisse des besoins de chauffage du secteur résidentiel,
- La baisse des besoins de chauffage du secteur tertiaire,
- La baisse des besoins de chauffage de l’industrie,
- La baisse des besoins de chauffage de l’ensemble des secteurs,
- La baisse des besoins de chauffage de l’ensemble des secteurs en retenant un θ_{th} égal à 8°C ,

48. Deux des scénarios de la liste présentée ci-dessous se distinguent par le fait qu’ils utilisent une valeur différente de ce seuil. Cela revient à faire différentes hypothèses concernant le niveau d’isolation moyen du parc de bâtiments en Suisse. Les effets de ces scénarios sont donc estimés en se basant sur des scénarios de référence différents: la consommation énergétique pour le chauffage de la baseline dépend en effet de l’hypothèse sur le niveau d’isolation des bâtiments.

- La baisse des besoins de chauffage de l’ensemble des secteurs en retenant un θ_{th} égal à 12°C,
- L’augmentation des besoins de climatisation du secteur résidentiel,
- L’augmentation des besoins de climatisation du secteur tertiaire,
- L’augmentation des besoins de climatisation des secteurs résidentiel et tertiaire,
- L’augmentation des besoins de climatisation du secteur résidentiel dans le cas de l’hypothèse haute,
- L’augmentation des besoins de climatisation des secteurs résidentiel (hypothèse haute) et tertiaire,
- L’impact de la baisse des besoins de chauffage et de l’augmentation des besoins de climatisation.

Le premier scénario a trait à la baisse des besoins de chauffage du secteur résidentiel, l’impact ex-ante (et donc introduit dans le modèle) correspond à une baisse de la consommation d’énergie fossile des ménages pour le poste résidentiel évalué à 12.7% en 2050, l’impact ex-post calculé par le modèle est estimé à 8.2%. La différence correspond à un effet rebond bien connu et documenté dans la littérature économique [30]. Au niveau de la Suisse dans son ensemble cela conduit à des baisses de consommation de produits pétroliers de 2.3% et de gaz naturel de 0.6%. En revanche, la consommation d’électricité suisse augmente de 0.7% faisant suite principalement à une augmentation de la demande des ménages. En effet, la baisse des dépenses de combustible des ménages leur permet d’augmenter les autres postes de la consommation de 0.2%. L’impact sur le bien-être est conséquent, l’augmentation du surplus est évalué à 937 Mio de CHF. Finalement, l’effet net de ces modifications sur les émissions de CO₂ est largement positif puisqu’elles baissent de 2.1% en 2050. Pour le secteur tertiaire, la réduction des besoins de chauffage conduirait à des baisses de consommation de produits pétroliers de 1.2% et de gaz naturel de 0.6%. D’autre part, la réduction des coûts de chauffage permettrait de réduire les prix de production des services ce qui bénéficierait à l’ensemble de l’économie. L’impact sur le bien-être des ménages est évalué à 382 Mio de francs suisse, alors que les émissions de CO₂ baisseraient de 1.0% en 2050. Dans le secteur de l’industrie, l’impact de la réduction des besoins de chauffage est, comme l’indique le tableau 37, beaucoup plus limité. Ceci est bien évidemment lié à la faible part dans les coûts de production de l’industrie du poste consommation d’énergie pour le chauffage (cf. tableau 33). L’impact sur l’ensemble de l’économie est positif avec un gain de bien-être estimé à 87 Mio de francs suisse. Si on estime l’impact total des nouveaux besoins de chauffage en prenant en compte l’ensemble des secteurs concernés (résidentiel, tertiaire et industrie), on constate que celui-ci est approximativement égale à la somme des trois scénarios précédemment détaillés. L’impact sur le bien-être est estimé à 1404 Mio de CHF. La prise en compte de seuils différents concernant le paramètre θ_{th} permet d’encadrer cette évaluation. Ainsi, le tableau 37 donne aussi les résultats pour $\theta_{th}=8$ et 12°C (i.e. pour un niveau d’isolation respectivement plus fort et plus faible).

Tableau 37 – Impacts d’une baisse de la demande d’énergie pour le chauffage en 2050*

	Secteur concerné ($\theta_{th}=10^{\circ}\text{C}$)			Ensemble des secteurs		
	Résidentiel	Tertiaire	Industrie	$\theta_{th}=12^{\circ}\text{C}$	$\theta_{th}=10^{\circ}\text{C}$	$\theta_{th}=8^{\circ}\text{C}$
<i>Consommation d’énergie</i>						
Produits pétroliers	-2.3%	-1.2%	-0.1%	-3.2%	-3.6%	-4.4%
Gaz naturel	-0.6%	-0.6%	-0.2%	-1.3%	-1.4%	-1.7%
Electricité	0.7%	-0.2%	0.0%	0.4%	0.5%	0.6%
Emissions de CO ₂	-2.1%	-1.0%	-0.1%	-2.9%	-3.2%	-3.9%
Surplus en Mio CHF ₂₀₁₀	937	382	87	1296	1404	1652
En % de la conso.	0.15%	0.06%	0.01%	0.20%	0.22%	0.26%

* en écart en pourcentage par rapport au compte de référence

Nous simulons maintenant l’impact d’une hausse des consommations d’électricité suite à un besoin accru de climatisation. Nous prenons en compte dans un premier temps cet effet uniquement pour le secteur résidentiel. L’impact apparaît faible au niveau des ménages puisque l’accroissement de consommation d’électricité pour satisfaire cette demande de climatisation est estimé ex-post à 1.2%. Dans le modèle, ce surcroît de consommation est couvert par une augmentation de la production d’électricité assurée à partir de gaz naturel (58%) et de renouvelable (42%). La consommation de gaz naturel augmenterait ainsi au niveau de la Suisse de 0.34% comme l’indique le tableau 38. Le coût de la climatisation des logements aurait un impact modéré sur la consommation des ménages, qui cependant réduirait légèrement leur consommation de produits pétroliers (-0.06%), permettant à la Suisse malgré l’augmentation de la production d’électricité à partir de gaz naturel de maintenir inchangée ses émissions de CO₂. L’impact final se traduirait par un coût de bien-être pour les ménages évalué à 84 Mio de CHF. En comparaison, le coût direct est de 97 Mio de CHF. Cela montre que les ménages s’adaptent et arrivent ainsi à réduire l’impact négatif de la hausse des besoins d’énergie pour la climatisation. Qualitativement, les résultats que nous venons de présenter restent inchangés dans le cas de l’hypothèse haute pour le secteur résidentiel, on constate simplement qu’ils sont environ multipliés par un facteur deux. Le recours accru à la climatisation dans le secteur tertiaire aurait un impact un peu plus important par rapport au premier scénario sur le résidentiel. Dans ce cas, la consommation d’électricité au niveau de la Suisse augmenterait de 0.58% conduisant à une augmentation de la consommation de gaz naturel pour la production d’électricité. L’impact sur le bien-être est alors estimé à -94 Mio de francs. Cependant, on note que la différence des coûts directs avec le surplus est plus grande que dans le scénario de la hausse des besoins de climatisation dans le résidentiel. Ceci s’explique par le fait que les ménages ne sont impactés qu’indirectement lorsque la hausse des besoins d’énergie pour la climatisation concerne le secteur tertiaire. Les possibilités d’adaptation sont alors plus nombreuses pour atténuer le choc ex-ante sur les consommateurs ce qui explique que les gains liés à l’adaptation endogène soient plus importants. En plus de ces trois scénarios, le tableau 38 donne également les impacts pour les deux scénarios combinant l’augmentation du recours à la climatisation dans les secteurs résidentiels et tertiaires.

Tableau 38 – Impacts d’une augmentation de la demande d’électricité pour la climatisation en 2050*

	Résidentiel	Résidentiel hyp. haute	Tertiaire	Total	Total hyp. haute
<i>Consommation d’énergie</i>					
Produits pétroliers	-0.06%	-0.14%	0.03%	-0.03%	-0.11%
Gaz naturel	0.34%	0.76%	0.54%	0.88%	1.30%
Electricité	0.40%	0.90%	0.58%	0.98%	1.47%
Emissions de CO ₂	0.00%	0.01%	0.11%	0.12%	0.12%
Coûts directs en Mio CHF ₂₀₁₀ **	97	212	151	248	363
Surplus en Mio CHF ₂₀₁₀	-84	-186	-94	-178	-281
En % de la conso.	-0.01%	-0.03%	-0.01%	-0.03%	-0.04%

* en écart en pourcentage par rapport au compte de référence

** ces coûts s’obtiennent en multipliant la hausse ex-ante des besoins en électricité par le prix ex-ante de l’électricité.

Finalement, l’impact total des nouveaux besoins en matière de chauffage et de climatisation est présenté dans le tableau 39. Ce scénario repose sur des hypothèses moyennes ($\theta_{th}=10$ pour le chauffage et une hypothèse moyenne concernant l’équipement en climatisation des ménages).

Tableau 39 – Impacts des nouveaux besoins de chauffage et de climatisation en 2050*

<i>Consommation d’énergie</i>	
Produits pétroliers	-3.6%
Gaz naturel	-0.5%
Electricité	1.5%
Emissions de CO ₂	-3.1%
Surplus en Mio CHF ₂₀₁₀	1225
En % de la conso	0.19%

* en écart en pourcentage par rapport au compte de référence

9.3.4 Résultats obtenus avec les scénarios climatiques CH2011

Nous complétons l’analyse des impacts des changements climatiques sur la demande d’énergie en Suisse en utilisant les prévisions de températures des nouveaux scénarios climatiques suisses CH2011 ⁴⁹.

Pour les trois périodes 2035, 2060 et 2085, nous avons calculés l’évolution des indicateurs HDD et CDD pour les scénarios d’émissions A1B et A2 ⁵⁰. A partir de ces résultats, les évolutions pour 2050 ont été interpolées. Elles sont montrées dans les tableau 40 et 41 ci-dessous. Il faut ajouter que les variations des deux indicateurs se calculent par rapport à la période de référence 1980–2009 qui n’est donc pas la même que celle utilisée avec les données d’ENSEMBLES. De plus, les

49. Plus précisément, nous avons utilisés les “regional scenarios at daily resolution based on probabilistic method”, cf. [26].

50. Notons tout de suite que les scénarios d’émissions A1B et A2 ne sont pas très différents jusqu’en 2050 ce qui se reflète dans les impacts calculés avec les données CH2011.

valeurs des indicateurs à la période de référence sont définies à partir de données de 64 stations météorologiques de MétéoSuisse⁵¹. Ces deux éléments ajoutent des facteurs de divergence par rapport aux résultats obtenus avec les données d’ENSEMBLES. Pour les HDD, les différences ne sont toutefois pas grandes comme cela est visible en comparant les valeurs pour le scénario “A1B medium” du tableau 40 ci-dessous avec celles du tableau 35. En revanche, la différence est plus marquée entre la valeur de la variation des CDD du tableau 36 et sa valeur équivalente du tableau 41 (i.e. +264.2%). Les résultats détaillés de l’évolution des indicateurs climatiques en 2035, 2060 et 2085 sont présentés aux annexes D.2 et D.3.

Tableau 40 – Calcul des HDD et de leurs variations en 2050 par rapport à la période de référence 1980–2009 sur la base des scénarios CH2011.

		$\theta_{th} = 8^{\circ}\text{C}$	$\theta_{th} = 10^{\circ}\text{C}$	$\theta_{th} = 12^{\circ}\text{C}$
Reference period (1980–2009)	Observed	2836.1	3101.7	3328.3
CH2011 (2050)	A2 lower	2548.7 -10.1%	2870.6 -7.4%	3057.4 -8.1%
	A2 medium	2304.0 -18.8%	2646.4 -14.7%	2844.4 -14.5%
	A2 upper	2068.2 -27.1%	2409.9 -22.3%	2643.4 -20.6%
	A1B lower	2533.9 -10.7%	2855.2 -7.9%	3041.9 -8.6%
	A1B medium	2282.4 -19.5%	2625.8 -15.3%	2825.1 -15.1%
	A1B upper	2040.1 -28.1%	2380.2 -23.3%	2617.0 -21.4%

51. Pour chaque station, la première étape a d’abord consisté à calculer les températures journalières moyennes de la période de référence. Les indicateurs climatiques ont ensuite été déterminés sur la base de ces températures journalières moyennes. Les valeurs des indicateurs obtenues pour chaque station météorologique ont ensuite été agrégées en fonction de la situation géographique de la station et de la répartition de la population sur le territoire suisse. La carte des poids, qui présente aussi la localisation des stations utilisées, est présentée à l’annexe D.1.

Tableau 41 – Calcul des CDD et de leurs variations en 2050 par rapport à la période de référence 1980–2009 sur la base des scénarios CH2011.

		$\theta_{bp} = 18.3^{\circ}\text{C}$	$\theta_{bp} = 20^{\circ}\text{C}$	$\theta_{bp} = 22^{\circ}\text{C}$
Reference period (1980–2009)	Observed	45.4	7.2	0.3
CH2011 (2050)	A2 lower	109.0 <i>140.1%</i>	29.9 <i>317.1%</i>	3.3 <i>834.6%</i>
	A2 medium	158.3 <i>248.5%</i>	55.7 <i>676.3%</i>	7.9 <i>2161.9%</i>
	A2 upper	216.1 <i>375.8%</i>	93.3 <i>1201.6%</i>	17.9 <i>5052.6%</i>
	A1B lower	113.6 <i>150.2%</i>	32.0 <i>345.9%</i>	3.6 <i>933.3%</i>
	A1B medium	165.4 <i>264.2%</i>	60.2 <i>740.0%</i>	8.8 <i>2428.3%</i>
	A1B upper	226.4 <i>398.4%</i>	100.9 <i>1307.3%</i>	20.5 <i>5802.5%</i>

Nous présentons ci-dessous les conséquences économiques des impacts calculés avec les données CH2011. Pour le chauffage, nous n’avons estimé les effets que pour les scénarios avec les impacts les plus extrêmes. Il s’agit du scénario “A2 lower” avec $\theta_{th} = 10^{\circ}\text{C}$ pour l’impact le plus faible et au scénario “A1B upper” avec $\theta_{th} = 8^{\circ}\text{C}$ pour l’impact le plus fort.

Tableau 42 – Impacts d’une baisse de la demande d’énergie pour le chauffage en 2050 sur la base des scénarios CH2011*

	Ensemble des secteurs	
	A2 lower $\theta_{th} = 10^{\circ}\text{C}$	A1B upper $\theta_{th} = 8^{\circ}\text{C}$
<i>Consommation d’énergie</i>		
Produits pétroliers	-1.8%	-7.0%
Gaz naturel	-0.7%	-2.6%
Electricité	0.2%	1.0%
Emissions de CO ₂	-1.63%	-6.29%
Surplus en Mio CHF ₂₀₁₀	705	2643
En % de la conso.	0.11%	0.41%

* en écart en pourcentage par rapport au compte de référence

On constate donc que les gains pour l’économie et la société suisse peuvent être très variables en fonction du scénario utilisé. En effet, les valeurs du surplus du tableau 42 définissent un très large intervalle. Par rapport au scénario de la colonne 5 du tableau 37, l’impact ex-ante est environ deux fois plus important dans le scénario “A1B upper” avec $\theta_{th} = 8^{\circ}\text{C}$ d’où le doublement du surplus (2643 versus 1404 mio CHF). Dans le scénario “A2 lower” avec $\theta_{th} = 10^{\circ}\text{C}$, l’impact

ex-ante est en revanche environ deux fois plus petit ce qui explique que le surplus soit environ divisé par deux (705 versus 1404 mio CHF).

Dans le cas de la climatisation, nous utilisons les résultats obtenus lorsque $\theta_{bp} = 18.3^\circ\text{C}$. Pour cette valeur du paramètre θ_{bp} , les deux scénarios extrêmes sont le scénario “A2 lower” pour l’impact le plus faible et le scénario “A1B upper” pour l’impact le plus élevé. Dans les deux premières colonnes du tableau 43, nous simulons un accroissement des besoins d’énergie pour la climatisation uniquement pour le secteur résidentiel dans le cas de l’hypothèse haute qui se réfère à une évolution optimiste concernant le taux d’équipement des ménages. Dans les deux colonnes suivantes, nous simulons un accroissement des besoins d’énergie pour la climatisation dans les secteurs résidentiels et tertiaires. Dans les deux dernières colonnes, nous simulons enfin un accroissement des besoins d’énergie pour la climatisation dans les deux secteurs en appliquant l’hypothèse haute pour le secteur résidentiel.

Tableau 43 – Impacts d’une hausse de la demande d’énergie pour la climatisation en 2050 sur la base des scénarios CH2011*

	Résidentiel hyp. haute		Total		Total hyp. haute	
	A2 lower	A1B upper	A2 lower	A1B upper	A2 lower	A1B upper
<i>Consommation d’énergie</i>						
Produits pétroliers	-0.14%	-0.21%	-0.03%	-0.04%	-0.11%	-0.15%
Gaz naturel	0.73%	1.16%	0.85%	1.60%	1.26%	2.22%
Electricité	0.87%	1.37%	0.94%	1.76%	1.42%	2.50%
Emissions de CO ₂	0.01%	0.02%	0.11%	0.23%	0.12%	0.24%
Coûts directs en Mio CHF ₂₀₁₀ **	206	319	239	440	351	608
Surplus en Mio CHF ₂₀₁₀	-182	-285	-171	-315	-271	-470
En % de la conso.	-0.03%	-0.04%	-0.03%	-0.05%	-0.04%	-0.07%

* en écart en pourcentage par rapport au compte de référence

** ces coûts s’obtiennent en multipliant la hausse ex-ante des besoins en électricité par le prix ex-ante de l’électricité.

A scénario comparable, les résultats obtenus avec le scénario climatique “A2 lower” fournissent des impacts qui sont très similaires à ceux calculés en utilisant les données d’ENSEMBLES à cause du fait que l’impact ex-ante est pratiquement similaire. En revanche, les résultats obtenus avec le scénario climatique “A1B upper” montrent que les impacts peuvent être beaucoup plus importants et engendrer une perte de bien-être en 2050 jusqu’à un montant égal à 470 millions de CHF dans la cas le moins favorable.

9.4 Impacts des changements climatiques sur la production d’électricité

Résumé:

Les changements climatiques ont un impact négatif sur la production d’électricité thermique et hydraulique qui engendre des diminutions de surplus pour la Suisse en 2050 par rapport au compte de référence. Ces pertes sont néanmoins assez faibles, surtout lorsqu’on les compare aux bénéfices économiques liés à la diminution des besoins de chauffage.

9.4.1 Impacts sur la production des centrales nucléaires

Sensibilité de la production des centrales nucléaires aux températures

Afin d'estimer l'impact d'une hausse des températures sur la production des centrales nucléaires, nous utiliserons les résultats d'une étude économétrique récente. Linnerud et al. [64] analysent l'impact de la température ambiante sur la production des centrales nucléaires. Rappelons ici qu'une hausse des températures a un double impact sur la production électrique d'une centrale thermique via 1/ une baisse de l'efficacité et 2/ une fermeture partielle ou complète d'une centrale à partir d'un certain seuil de température. Ce second effet est particulièrement visible en cas de sécheresses ou de vagues de chaleur et a le plus souvent pour cause un accès réduit à l'eau de refroidissement et/ou une contrainte liée à la température maximale de rejet de l'eau de refroidissement. L'approche économétrique utilisée dans [64] est bien détaillée et se veut rigoureuse ce qui nous a motivé à en utiliser les résultats pour notre projet.

Deux analyses statistiques/économétriques sont menées dans [64] à l'aide de deux bases de données différentes. La première analyse utilise des données horaires de capacité d'utilisation et de température de l'air au niveau d'une seule centrale nucléaire⁵². Ces résultats sont difficilement généralisables puisque obtenus pour une seule centrale, raison pour laquelle nous ne les utiliserons pas dans le cadre de notre projet. Nous avons plutôt utilisé les résultats de la seconde analyse économétrique qui se base sur des données mensuelles agrégées au niveau de 7 pays européens et dont la portée est de ce fait plus générale⁵³. En revanche, une faiblesse de cette analyse est qu'elle ne permet pas de différencier l'impact de la baisse de l'efficacité de celui de l'arrêt partiel ou total des centrales sur la production. Tout au plus, l'analyse tient compte du fait que la production est affectée d'une manière croissante lorsque la température augmente puisqu'un nombre toujours plus important de centrales doivent réduire leur activité. Un des modèles estimés pour expliquer la capacité d'utilisation des centrales nucléaires d'un pays i durant la période t est le suivant:

$$\begin{aligned} y_{it} &= g(T_{it}, Pr_{it}) + \mu_i + \delta_t + \varepsilon_{it} \\ &= \beta_0 + \beta_1 \cdot T_{it} + \beta_2 \cdot T_{it}^2 + \beta_3 \cdot D_m + \beta_4 \cdot D_m \cdot T_{it} \\ &\quad + \beta_5 \cdot D_m \cdot T_{it}^2 + \beta_6 \cdot Pr_{it} + \mu_i + \delta_t + \varepsilon_{it} \end{aligned} \tag{11}$$

y_{it} : capacity utilization of nuclear power plants (percent)

μ_i : a country fixed effect

T_{it} : monthly ambient temperature in °C

D_m : dummy variable for the summer months (May-September)

Pr_{it} : endogenously determined electricity price in the wholesale market

δ_t : a time fixed effect

ε_{it} : an error term

L'impact croissant de la température ambiante sur la capacité d'utilisation est formalisé dans l'équation 11 en introduisant un terme quadratique pour la température. D_m est une "variable

52. La capacité d'utilisation d'une centrale est définie comme le rapport entre la production d'électricité effective et la production théorique maximale de la centrale durant une période donnée.

53. Les données mensuelles utilisées couvrent la période allant de 1995 à 2008 pour les pays suivants: Allemagne, Belgique, Espagne, Finlande, France, Royaume-Uni et Suède.

dummy” pour les mois d’été (mai-septembre) qui a été introduite afin de prendre en compte l’impact des périodes de maintenance sur la production des centrales nucléaires. Les coefficients de l’équation sont estimés en utilisant un estimateur particulier, le “two-stages least squares estimator”. L’idée de cette démarche est d’identifier en premier lieu la composante exogène des prix de l’électricité et de l’utiliser dans l’estimation de l’équation 11 afin de tester l’hypothèse que les variations de la demande d’électricité (comme celles qui peuvent être induites par des changements de température) n’influencent pas la capacité d’utilisation des centrales nucléaires⁵⁴.

Nous utilisons l’estimation de l’équation 11 (en ne gardant que les termes significatifs) pour calculer l’effet d’une hausse ΔT de température sur la production mensuelle qui est notée q ci-dessous. La formule 12 est valable pour les mois d’hiver alors que la formule 13 l’est pour les mois d’été:

$$\begin{aligned}\widehat{\Delta q/q} &= \frac{\Delta \hat{y}}{\hat{y}} \\ &= (\hat{g}(T + \Delta T, Pr) - \hat{g}(T, Pr)) / \hat{g}(T, Pr) \\ &= \frac{-0.666 \cdot \Delta T - 0.023 \cdot ((T + \Delta T)^2 - T^2)}{92.440 - 0.666 \cdot T - 0.023 \cdot T^2}\end{aligned}\tag{12}$$

$$\widehat{\Delta q/q} = \frac{-0.666 \cdot \Delta T - 0.023 \cdot ((T + \Delta T)^2 - T^2)}{69.830 - 0.666 \cdot T - 0.023 \cdot T^2}\tag{13}$$

Dans quelle mesure ces estimations prennent-elles en compte l’adaptation aux changements climatiques des exploitants des centrales? Aux températures basses, les résultats obtenus avec les données en panel montrent une sensibilité un peu plus forte de la production d’électricité à une hausse de la température en comparaison de ceux obtenus en se basant sur les données d’une seule centrale. Linnerud et al. [64] pensent que cette différence provient du fait que les exploitants de certaines centrales ont pris des mesures dans le but d’éviter leur fermeture partielle ou totale, mesures qui se font au prix d’une perte d’efficacité. Si de nouvelles centrales voient le jour, il est possible que le système de refroidissement par circuit fermé (c’est-à-dire avec une tour de refroidissement) soit préféré au système ouvert puisque ce dernier est par nature plus sensible aux changements climatiques. Cette évolution se ferait probablement au détriment de l’efficacité. Dans un premier temps, nous ne prenons toutefois pas en compte ces possibles changements de technologie lorsque nous estimons ci-dessous la baisse de production des centrales

54. Cette hypothèse est effectivement validée par les résultats puisque le coefficient du prix de l’électricité n’est pas significatif au niveau de 5%. Cette hypothèse joue un rôle important dans l’identification de l’effet causal de la hausse des températures sur la production nucléaire. Sans cette hypothèse, l’effet estimé de la température sur la production nucléaire prendrait non seulement en compte l’effet technique sur la production mais refléterait également la manière dont la demande d’électricité change avec une hausse de la température (le fait de prendre en compte la composante exogène du prix de l’électricité dans la régression ne permet pas de résoudre ce problème d’identification car la variable exogène de prix a , dans le contexte analysé, les caractéristiques d’un “bad control”).

nucléaires par rapport au scénario de référence.

Une remarque doit encore être faite concernant l’approche développée dans [64]. En fait, l’eau plutôt que l’air est le “cooling medium” utilisé dans les centrales nucléaires. Par conséquent, notre intérêt devrait avant tout se porter sur la manière dont les changements climatiques vont influencer la température de l’eau utilisée pour le refroidissement (et sa disponibilité) et quels vont en être les effets sur la production d’électricité nucléaire. Toutefois, il est clair que la température de l’eau est liée à celle de l’air. Dans le cas d’un système avec tour de refroidissement, le lien semble même assez immédiat. Ainsi, Linnerud et al. [64] citent l’exemple de la centrale nucléaire sur laquelle ils ont basé la première partie de leur analyse : “*According to the plant management, a 1°C raise in the ambient temperature raises the cooling water temperature by only about 0.4 to 0.5°C within an hour.*” Donc la hausse de la température de l’air se répercute pleinement après quelques heures sur la température de l’eau de refroidissement. Cela doit probablement mettre un peu plus de temps pour augmenter la température de l’eau d’une rivière de 1°C mais l’avantage de l’approche que nous utilisons est qu’elle se base sur des données mensuelles de température de l’air.

Pertes futures de production par la hausse des températures (scénarios ENSEMBLES)

Dans cette partie, les données climatiques que nous utilisons sont issues du projet ENSEMBLES. Les données sur les températures mensuelles moyennes de l’air fournies aux différents points de la maille sont agrégées en utilisant une pondération qui prend en compte la localisation des centrales nucléaires sur le territoire suisse. Les baisses de production que nous calculons pour chaque mois à différentes périodes (2000, 2010, 2020, 2030, 2040 et 2050) sont ensuite agrégées en une seule valeur de variation annuelle à l’aide des données mensuelles de la production nucléaire issues des statistiques suisses de l’électricité (tableaux sur la production des documents “Production et consommation totales d’énergie électrique en Suisse”).

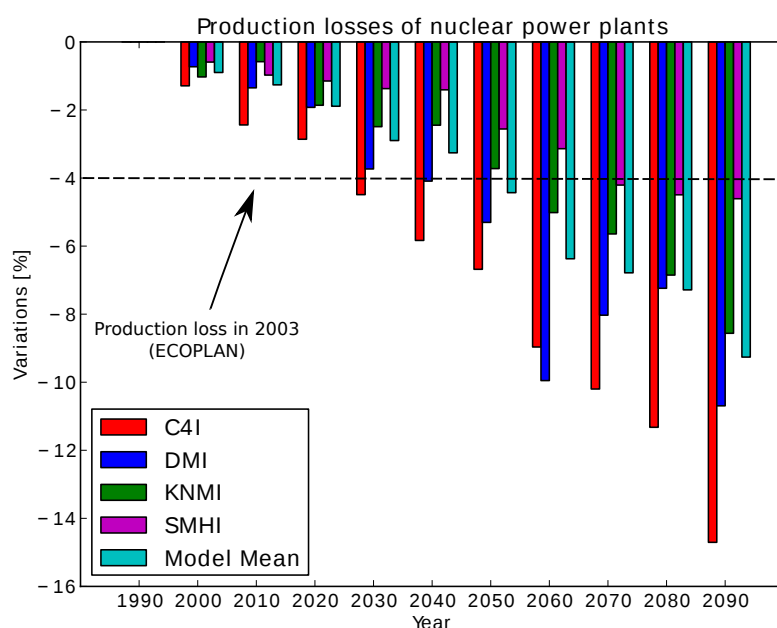


Figure 36 – Perte estimée dans la production d’électricité nucléaire liée à une hausse des températures.

Lorsqu’on utilise la moyenne des quatre scénarios climatiques d’ENSEMBLES (scénario “Model Mean”), il est intéressant de noter que la perte de production nucléaire calculée à l’horizon 2050, qui est de -4.4%, est à peu près égale à la perte de production observée en 2003.

Pertes futures de production par la hausse des températures (scénarios CH2011)

Dans cette partie, les données climatiques que nous utilisons sont issues non plus des scénarios d’ENSEMBLES mais des scénarios CH2011. Les températures mensuelles moyennes actuelles et futures de 64 stations de MétéoSuisse sont agrégées en utilisant une pondération qui prend en compte la localisation des centrales nucléaires sur le territoire suisse.⁵⁵ Pour les 12 mois de l’année, nous calculons, sur la base des équations 12 et 13, des baisses de production pour les périodes utilisées dans les scénarios CH2011 (2035, 2060 et 2085) par rapport à la période de référence 1980–2009 et interpolons celles pour 2050. Les variations mensuelles de production sont ensuite agrégées en une seule valeur de variation annuelle à l’aide des données mensuelles de la production nucléaire issues des statistiques suisses de l’électricité. Le tableau 44 résume les résultats que nous avons trouvés.

55. Du fait qu’il n’y a que cinq centrales nucléaires en Suisse, qui plus est, situées dans un périmètre assez rapproché, seules trois stations de MétéoSuisse ont reçu un poids non nul. Ainsi, la station de Bern/Zollikofen a un poids de 0.11, celles de Hallau et de Wynau un poids respectivement de 0.59 et 0.3.

Tableau 44 – Variations annuelles de la production des centrales nucléaires, par rapport à la période de référence 1980–2009, calculées sur la base des scénarios CH2011.

	2035	2050 ¹	2060	2085
A2 lower	-0.7%	-1.3%	-2.3%	-4.3%
A2 medium	-1.7%	-2.3%	-3.7%	-6.4%
A2 upper	-2.7%	-3.3%	-5.1%	-8.7%
CH2011				
A1B lower	-0.8%	-1.4%	-2.4%	-3.7%
A1B medium	-1.9%	-2.4%	-3.8%	-5.5%
A1B upper	-3.0%	-3.5%	-5.2%	-7.4%

¹ Valeurs interpolées.

Jusqu’à l’horizon 2060, nous voyons que les impacts ex-ante que nous trouvons avec les données CH2011 sont soit plus faibles soit très proches de ceux calculés avec les données d’ENSEMBLES. Pour cette raison, nous nous contenterons ci-dessous de calculer les conséquences économiques de la baisse de production des centrales thermiques uniquement à partir des données d’ENSEMBLES.

9.4.2 Impacts économiques de la baisse de la production d’électricité thermique

Comme il a été dit dans la section 8.3 nous avons supposé que la Suisse applique un moratoire nucléaire et que la sortie du nucléaire est effective en 2035. Pour autant le remplacement des centrales nucléaires en partie par des centrales thermiques au gaz naturel laisse inchangée la sensibilité de la production d’électricité à l’augmentation des températures. En effet ces centrales au gaz naturel recourent elles aussi à l’eau comme source de refroidissement et sont de même affectées par des baisses d’efficacité dues à l’augmentation des températures. On peut en outre penser que la localisation géographique de ces centrales au gaz naturel seront proches des centrales nucléaires existantes pour répondre aux contraintes techniques d’équilibre du réseau de transport de l’électricité. Ces raisons rendent pertinente l’utilisation des impacts calculés dans la figure 36. Le tableau 45 présente ces impacts en 2050 sur la base du scénario “Model Mean” d’ENSEMBLES, la baisse d’efficacité des centrales au gaz naturel se traduirait par une augmentation de leurs coûts de fonctionnement qui pénaliserait cette technologie⁵⁶. Sa production diminuerait de 418 GWh, en contrepartie la production d’énergie à partir de renouvelable augmenterait de 145 GWh. L’impact final serait une augmentation du prix de la production d’électricité de 1.58% qui conduirait à une baisse de la consommation d’électricité limitée à

56. Nous procédons comme si l’impact des changements climatiques sur la production des centrales thermiques se faisait uniquement à travers une baisse d’efficacité des centrales. Toutefois, nous reconnaissons que cette manière de procéder n’est pas complètement correcte étant donné que les impacts estimés dans la sous-section 9.4.2 reflètent également l’effet des températures sur le taux d’utilisation des centrales thermiques.

0.39%. La baisse de rendement thermique des centrales au gaz naturel augmenterait la consommation de gaz de la Suisse de 1.37%. L'impact final sur l'ensemble de l'économie serait limité, la perte de bien-être est estimée à 165 millions de francs. Enfin, le coût d'adaptation évalué ici par l'augmentation des coûts de production d'électricité pour palier au déficit de production thermique compte tenu de la variation ex-post de la production est de 85 millions de francs.

Tableau 45 – Impacts de la baisse de production des centrales thermique en 2050*

<i>Consommation d'énergie</i>	
Produits pétroliers	0.00%
Gaz naturel	1.37%
Électricité	-0.39%
Emissions de CO ₂	0.24%
Coût d'adaptation en CHF ₂₀₁₀	85
Surplus en Mio CHF ₂₀₁₀	-165
en % de la conso.	-0.03%
<i>Variation de la Production en GWh</i>	
Gaz naturel	-418
Hydraulique	0
Renouvelable	145
Total	-272

* en écart en pourcentage par rapport au compte de référence

9.4.3 Impacts sur la production hydraulique

Nous nous sommes fortement inspirés de la méthodologie employée par Ecoplan/Sigmaplan dans leur rapport (cf. [31]) pour estimer la baisse de production des centrales hydrauliques qui sera induite en Suisse par les changements climatiques. Cette méthodologie lie d'abord les précipitations avec les débits puis les débits avec la production hydraulique. Pour cette deuxième étape, nous partons du principe simpliste que l'évolution de la production hydraulique suit celle des débits.

Dans un premier temps, nous avons cherché à établir une relation empirique entre la variation des précipitations annuelles et la variation des débits annuels. Une telle relation pour la Suisse peut être déduite à l'aide des résultats de simulations de modèles hydrologiques basées sur dix scénarios climatiques d'ENSEMBLES. Ces simulations ont été effectuées par Massimiliano Zappa dans le cadre du projet CC-Hydro pour les périodes 2021–2050 et 2070–2099. Concrètement, nous représentons les 10 scénarios climatiques dans un plan où l'abscisse représente la variation relative des précipitations annuelles et l'ordonnée la variation relative des débits annuels entre la période de référence (1980–2009) et 2050 (valeurs interpolées). Ensuite, nous calibrons une droite à ce nuage de 10 points. Pour les données annuelles, la relation est pratiquement linéaire entre les variations des précipitations et celles des débits ce qui se reflète dans un coefficient de détermination (R^2) de notre régression proche de 1. Toutefois, il est intéressant de noter que l'agrégation des données au niveau annuel cache d'assez grosses différences mensuelles concernant le lien entre les précipitations et les débits. La qualité de la relation linéaire entre les précipitations et les débits est moins bonne durant les mois où les volumes d'eau dépendent de la fonte de la neige et des glaces. Le tableau 46 donne la valeur du R^2 de la régression des variations relatives des débits sur les variations relatives des précipitations au niveau annuel aussi bien que pour les différents mois de l'année. Nous nous basons ensuite sur ces relations linéaires

pour déterminer la variation des débits correspondant à la variation des précipitations (entre la période de référence 1961–1990 et 2050) que nous calculons à l’aide des scénarios d’ENSEMBLES que nous utilisons.

Tableau 46 – Coefficients de détermination d’un modèle linéaire reliant les variations relatives des débits avec les variations relatives des précipitations pour les différents mois de l’année.

	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEPT	OCT	NOV	DEC
R^2	0.84	0.82	0.38	0.53	0.14	0.55	0.93	0.94	0.94	0.87	0.84	0.69
R^2 (Year)=0.99												

Notons que la variation relative du débit annuel (i.e. de la production hydraulique annuelle) peut être ensuite obtenue de deux manières qui ne donnent pas totalement les mêmes résultats. A l’image de ce qui a été fait pour le nucléaire, la première de ces méthodes consiste à agréger les variations mensuelles de production en une seule valeur de variation annuelle à l’aide des données mensuelles de la production hydraulique issues des statistiques suisses de l’électricité. L’autre solution consiste à utiliser directement la variation annuelle du débit que nous avons calculée. En vertu des caractéristiques des R^2 que nous avons présentés à la figure 46, nous préférons cette deuxième méthode qui nous fournit les résultats suivants détaillés dans le tableau 47.

Tableau 47 – Variations en pourcent des débits à l’horizon 2050 pour différents scénarios climatiques d’ENSEMBLES.

	Model Mean	C4I	DMI	KNMI	SMHI
%var	-2.2	-1.2	-9.4	-1.9	1.3

9.4.4 Impacts économiques de la baisse de la production d’électricité hydraulique

Nous simulons les impacts du scénario “Model Mean” d’ENSEMBLES présenté dans le tableau 47. Pour palier au déficit de production hydraulique, la Suisse augmenterait sa production d’électricité à partir de renouvelable et de gaz naturel. L’augmentation du prix de l’électricité serait limitée à 0.58% compte tenu des hypothèses de coût de production de l’électricité du photovoltaïque assez optimiste (cf. section 8.3) et la consommation d’électricité resterait quasiment inchangée. La perte de bien-être serait limitée à 99 millions de francs. Le coût d’adaptation serait limité compte tenu du faible coût du renouvelable et est estimé à 31 millions de francs.

Tableau 48 – Impacts de la baisse de production des centrales hydrauliques en 2050*

<i>Consommation d'énergie</i>	
Produits pétroliers	0.02%
Gaz naturel	1.25%
Électricité	-0.14%
Emissions de CO ₂	0.24%
Coût d'adaptation en CHF ₂₀₁₀	31
Surplus en Mio CHF ₂₀₁₀	-99
En % de la conso.	-0.02%
<i>Variation de la Production en GWh</i>	
Gaz naturel	420
Hydraulique	-816
Renouvelable	297
Total	-100

* en écart en pourcentage par rapport au compte de référence

9.5 L'impacts net des changements climatiques sur le secteur de l'énergie

La variante que nous présentons dans cette sous-section intègre tous les impacts des changements climatiques que nous avons analysés jusqu'à présent, à savoir la variation de la demande d'énergie liée aux nouveaux besoins de chauffage et de climatisation ainsi que les pertes de production d'électricité des centrales thermiques et de l'hydraulique. Pour chacun de ces impacts, les résultats présentés ci-dessous se basent sur les hypothèses moyennes et les scénarios d'ENSEMBLES.

Tableau 49 – Impacts totaux sur le secteur de l'énergie en 2050*

<i>Consommation d'énergie</i>	
Produits pétroliers	-3.6%
Gaz naturel	2.2%
Électricité	1.3%
Emissions de CO ₂	-2.6%
Surplus en Mio CHF ₂₀₁₀	1077
En % de la conso	0.2%
<i>Variation de la Production en GWh</i>	
Gaz Naturel	497
Hydraulique	-816
Renouvelable	920
Total	601

* en écart en pourcentage par rapport au compte de référence

L'impact net des changements climatiques sur le secteur de l'énergie est donc largement positif puisque la variation de bien-être atteint 1077 million CHF en 2050.

9.6 Impacts des changements climatiques sur le secteur du tourisme

Résumé:

Les changements climatiques entraînent une baisse de l’enneigement naturel en Suisse en 2050. Lorsqu’on fait subir des diminutions de la dotation en neige uniquement à la Suisse, son économie encoure des pertes de bien-être et la production des secteurs de tourisme d’hiver recule. Les coûts estimés par GEMINI-E3 sont toutefois plus faibles que les coûts directs de la baisse de l’enneigement. La différence est due à l’adaptation endogène. L’adaptation sous forme d’enneigement artificiel permet de réduire encore davantage les effets négatifs des changements climatiques. Toutefois, l’analyse ne prend pas en compte les coûts environnementaux de la neige artificielle. Enfin, la prise en compte des effets des changements climatiques sur le reste du monde transforme les pertes de bien-être en gains pour l’économie suisse et allège le coût des changements climatiques pour les secteurs de sport d’hiver. Ces effets modifient les flux touristiques en partance et à destination de la Suisse d’une manière avantageuse pour son économie.

9.6.1 Variation de la dotation en neige

La variation de la dotation en neige est calculée à l’aide de la variable “Fractional Snow Cover” issue du projet ENSEMBLES. Nous dérivons d’abord des valeurs moyennes de cette variable pour les différents mois de l’année jusqu’à l’horizon 2090. Ces valeurs sont calculées pour chaque point de la maille des modèles climatiques d’ENSEMBLES situé sur le territoire de la Suisse et de quatre autres pays alpins (Allemagne, Autriche, France, Italie). Dans un deuxième temps, il nous a fallu trouver un moyen de les agréger par région du modèle (CH et EUR) afin d’obtenir une valeur unique (à un horizon de temps donné) pour les différents mois de l’année. Pour chacune des deux régions CH et EUR, cela s’est fait en allouant des poids spécifiques à chaque point de la maille. Pour la Suisse, ces poids sont par ailleurs propres à chaque segment touristique de sports d’hiver. Les figures 37 et 38 présentent ces deux jeux de poids. Ils ont été calculés sur la base de la localisation de l’offre de pistes de ski sur le territoire suisse ainsi que sur la base de la répartition entre “skieur-touriste” et “skieur-excursionniste” estimée pour différentes régions de ski (cf. [62]).

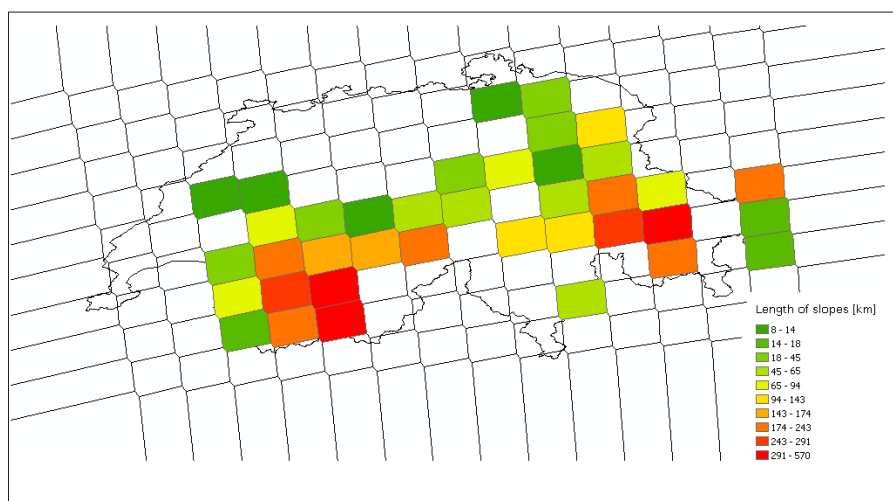


Figure 37 – Poids utilisés pour le segment “winter overnight tourism”.

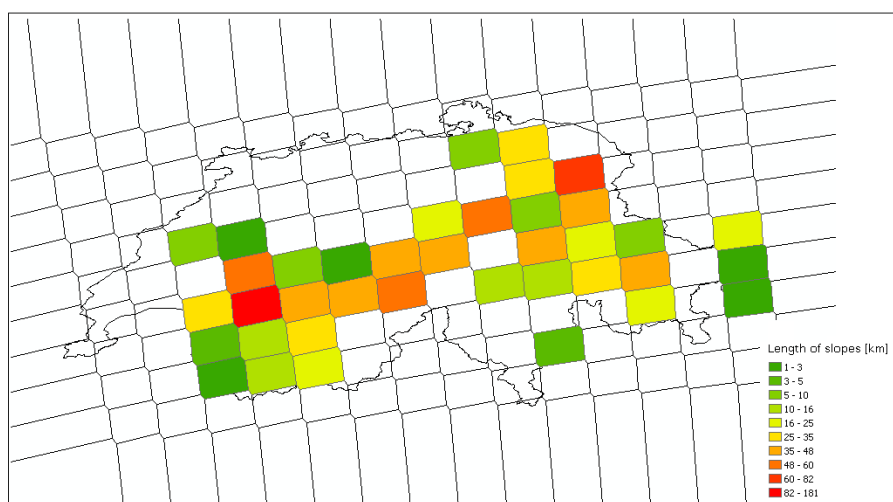


Figure 38 – Poids utilisés pour le segment “one-day winter tourism”.

Pour le segment “winter overnight tourism”, nous pouvons ainsi voir que les poids les plus forts sont alloués aux points de la maille situés dans certaines régions alpines éloignées des agglomérations urbaines. La différence est bien marquée avec le segment “one-day winter tourism” où les poids sont plus forts aux points de la maille situés dans les zones préalpines.

En ce qui concerne la région EUR, les poids ont été déterminé à l’aide des données fournies par Shardul Agrawala (OCDE) et Bruno Abegg (Hochschule für Technik und Wirtschaft Chur) sur l’offre touristique (kilomètres de pistes) des stations de ski situées dans les Alpes allemandes, autrichiennes, françaises et italiennes. Nous avons complété ces données pour inclure aussi d’autres régions de ski propres à ces quatre pays qui représentent un peu plus de 80% de la consommation totale de ski dans la région EUR. Finalement, nous faisons l’hypothèse que les poids ainsi calculés pour la Suisse et l’Europe restent constants dans le temps.⁵⁷

Le calcul de la dotation en neige à différentes périodes nécessite encore de pondérer les valeurs calculées pour les différents mois de l’année. Idéalement, nous voudrions baser cette pondération

57. Cela signifie que nous ne prenons pas en compte, dans notre analyse, les mesures d’adaptation qui consistent soit à fermer un domaine skiable soit à en agrandir ou en ouvrir un là où les conditions d’enneigement sont meilleures.

sur la distribution des recettes de transport du secteur des remontées mécaniques en Suisse et en Europe durant les mois de la saison d’hiver. Bien que l’information sur la distribution des recettes de transport existe dans certaines entreprises, elle n’est toutefois pas disponible globalement pour la Suisse. En revanche, elle l’est au niveau sectoriel pour l’Autriche:

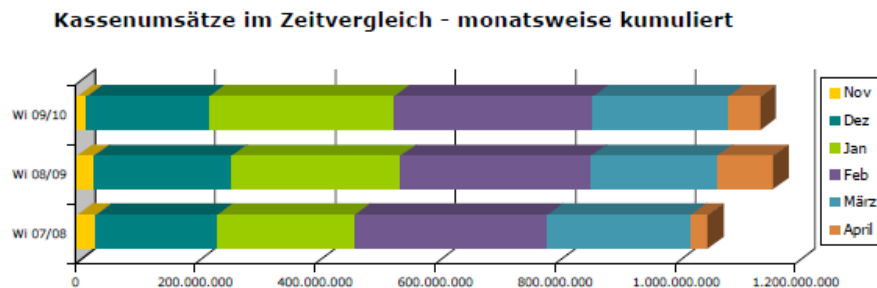


Figure 39 – Distribution des recettes de transport du secteur autrichien des remontées mécaniques durant les mois de la saison d’hiver. (Source: [49])

Sur la base de la figure 39 ainsi que sur celle d’informations récoltées auprès d’entreprises de remontées mécaniques suisses, nous avons donné les poids suivants aux différents mois de la saison d’hiver :

Tableau 50 – Poids attribué pour le projet à chaque mois de la saison d’hiver.

November	December	January	February	March	April
0.03	0.17	0.25	0.35	0.15	0.05

Nous utilisons ce dernier ensemble de poids afin de pondérer les différents mois de la saison d’hiver. Les variations de la dotation en neige à la période y par rapport à la période de référence sont alors calculées à l’aide de la formule suivante:

$$\%var^y = 100 \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^{12} \alpha_i \cdot x_i^y}{\sum_{i=1}^{12} \alpha_i \cdot x_i^{ref}} - 1 \right) \quad (14)$$

où x_i^y représente la valeur de la variable “Fractional Snow Cover” pour le mois i de la période y et où les α_i sont les poids pour les différents mois qui sont définis selon les valeurs du tableau 50.

Ci-dessous, nous présentons les variations par rapport à la période de base 1961–1990 de la dotation en neige. Elles ont été calculées à l’aide de l’équation 14 pour les différents modèles d’ENSEMBLES que nous utilisons ainsi que pour les deux régions CH et EUR.

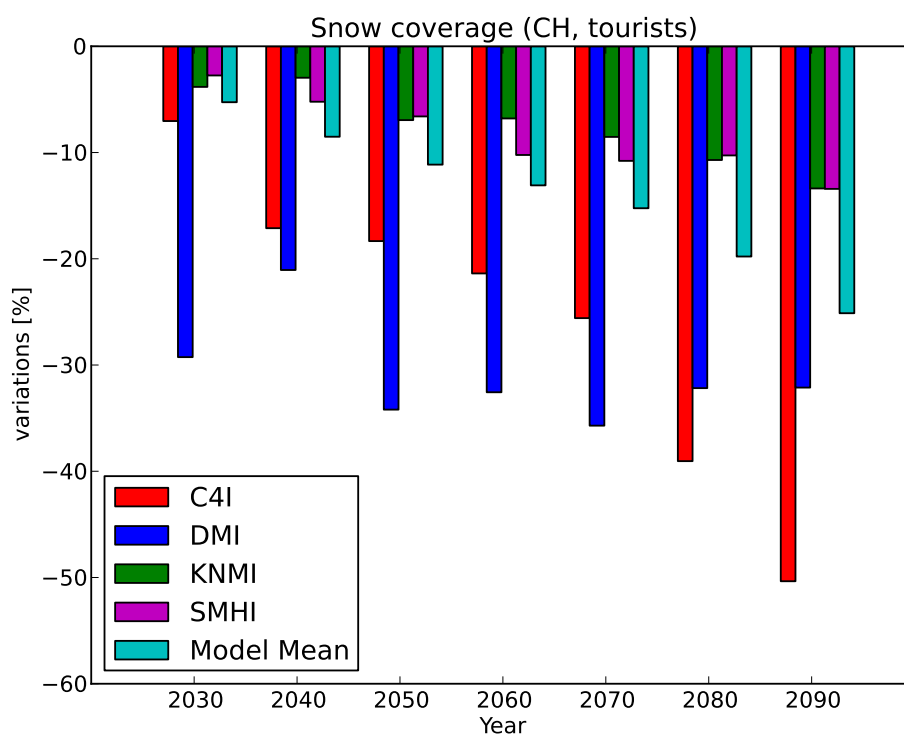


Figure 40 – Variations par rapport à la période 1961–1990 de la variable “Fractional Snow Cover” pour le segment touristique “winter overnight tourism”.

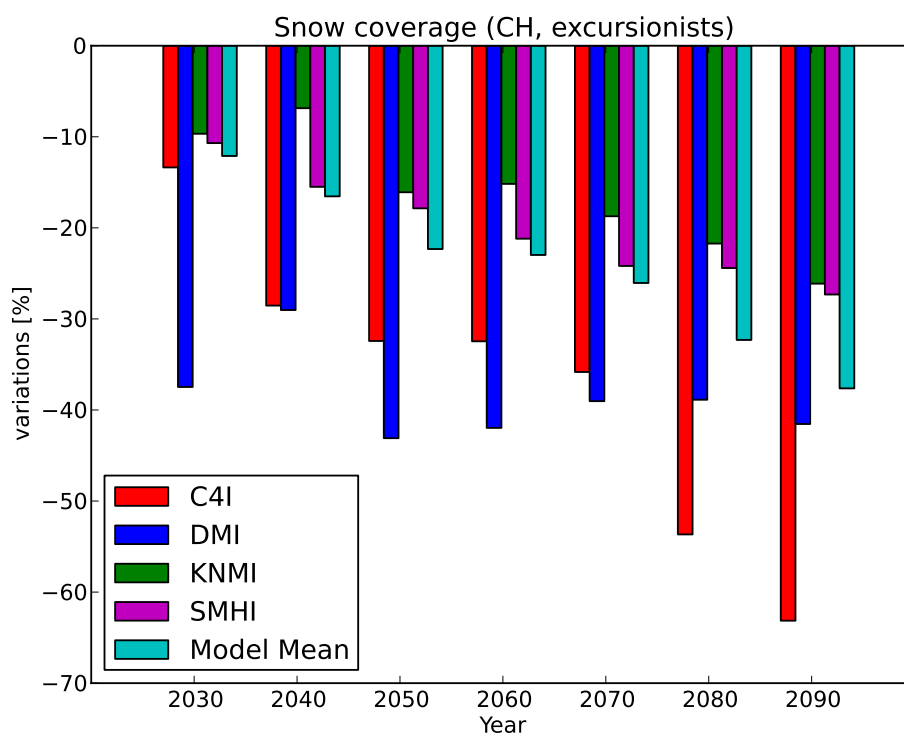


Figure 41 – Variations par rapport à la période 1961–1990 de la variable “Fractional Snow Cover” pour le segment touristique “one-day winter tourism”.

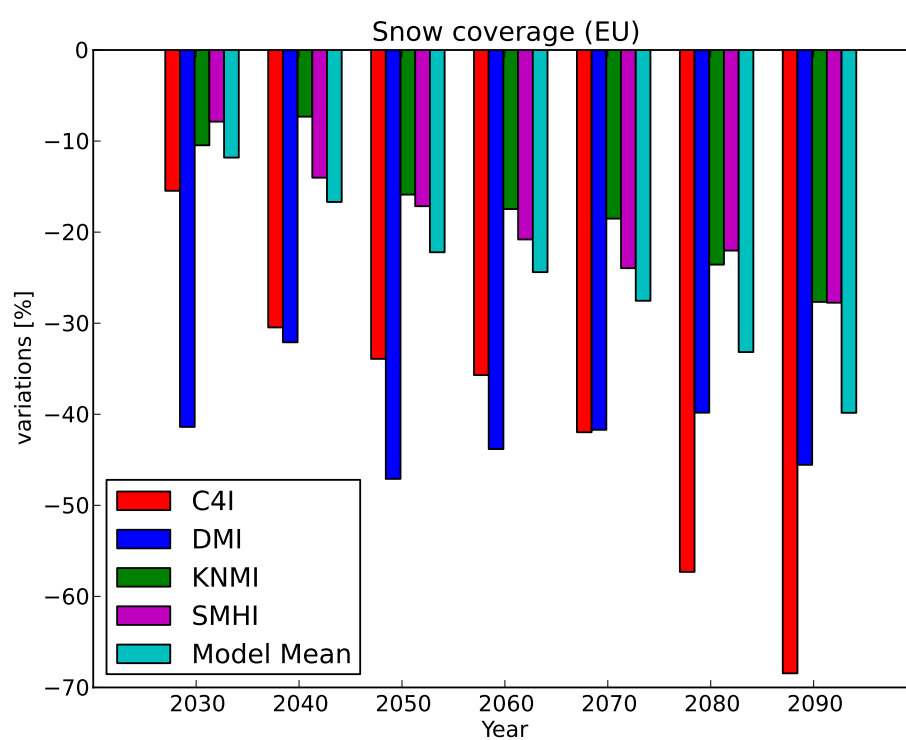


Figure 42 – Variations par rapport à la période 1961–1990 de la variable “Fractional Snow Cover” pour le secteur de sports d’hiver de la région EUR.

Pour une période donnée, il est également possible de pondérer les différents mois de la saison d'hiver à l'aide d'un second jeu de poids que nous qualifions d'“optimal”. Cette variante a pour but de prendre en compte le comportement des skieurs qui adapteront les périodes auxquelles ils iront skier à l'évolution de l'enneigement durant la saison d'hiver. Nous permettons par conséquent à la distribution des skieurs au cours de la saison d'hiver de varier dans le temps ce qui a pour conséquence d'atténuer l'impact des changements climatiques. Nous admettons par exemple une variation maximale des poids mensuels de $\pm 30\%$ en 2050 et de $\pm 50\%$ en 2090 par rapport à leur valeur actuelle. Avec ces nouveaux poids, les variations de la dotation en neige sont calculées selon l'équation 15:

$$\%var_{opt}^y = 100 \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^{12} \alpha_i^y \cdot x_i^y}{\sum_{i=1}^{12} \alpha_i \cdot x_i^{ref}} - 1 \right) \quad (15)$$

Le jeu de poids “optimal” est la solution au problème suivant d'optimisation sous contraintes:

$$\begin{aligned} \max \quad \%var^y(\mathbf{a}^y) &= 100 \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^{12} a_i^y \cdot x_i^y}{\sum_{i=1}^{12} \alpha_i \cdot x_i^{ref}} - 1 \right) \\ s.t. \quad &\sum_{i=1}^{12} a_i^y = 1 \\ &a_i^y \in [\alpha_i \pm \gamma(y) \cdot \alpha_i], \quad i = 1, \dots, 12 \end{aligned} \quad (16)$$

où le coefficient $\gamma(y)$ est fixé à 0.3 pour $y=2050$ et à 0.5 pour $y=2090$.

Le tableau 51 résume les valeurs de réduction de la dotation en neige calculées pour les régions CH et EUR, les différents scénarios, les différents jeux de poids et les périodes 2050 et 2090. Il contient aussi les valeurs de baisse de l'enneigement que nous avons définies pour les autres régions du modèle.

Tableau 51 – Variations de la dotation en neige en 2050 et 2090 pour les différentes régions du modèle.

Region	Segment	Model	Snow endowment			
			2050		2090	
			%var	%var _{opt}	%var	%var _{opt}
CH	Overnight	Model Mean	-11.1	-9.2	-25.1	-21.3
		C4I	-18.3	-12.8	-50.4	-45.0
		DMI	-34.2	-29.9	-32.1	-26.0
		KNMI	-6.9	-5.1	-13.4	-10.2
		SMHI	-6.6	-3.0	-13.4	-9.0
	One-day	Model Mean	-22.3	-19.8	-37.6	-33.8
		C4I	-32.4	-26.2	-63.1	-58.7
		DMI	-43.1	-39.4	-41.5	-36.5
		KNMI	-16.1	-13.5	-26.1	-22.2
		SMHI	-17.9	-11.7	-27.3	-22.0
EUR	Winter sports	Model Mean	-22.2	-19.3	-39.8	-35.8
		C4I	-33.9	-26.3	-68.4	-63.8
		DMI	-47.1	-43.2	-45.6	-41.4
		KNMI	-15.9	-12.7	-27.7	-23.9
		SMHI	-17.2	-10.3	-27.8	-21.4
BRI	Winter sports	—	-20.0	-17.0	—	—
OEC	Winter sports	—	-20.0	-17.0	—	—
ROW	Winter sports	—	-20.0	-17.0	—	—
USA	Winter sports	—	-20.0	-17.0	—	—

9.6.2 Impacts économiques de la baisse de l’enneigement naturel

Nos simulations des impacts d’une baisse de la dotation en neige naturelle en 2050 se basent sur sept scénarios. Notre premier scénario “CHE” ne prend en compte qu’une baisse de l’enneigement en Suisse et intègre l’adaptation du côté des producteurs. Ci-dessous, nous détaillons également les six autres scénarios en soulignant ce qui les distinguent de ce premier scénario:

1. *scénario CHE*: scénario avec une baisse de l’enneigement uniquement pour la Suisse et adaptation des producteurs suisses.
2. *scénario CHE-*: scénario avec une baisse de l’enneigement uniquement pour la Suisse et sans adaptation du côté des producteurs suisses (i.e. la production de neige artificielle est maintenue constante par rapport à la baseline).
3. *scénario WORLD*: scénario avec une baisse de l’enneigement pour toutes les régions du modèle et adaptation des producteurs.

4. *scénario WORLD SKIERS*: scénario incorporant en plus l’adaptation, par les consommateurs, de leur période de ski durant la saison d’hiver.
5. *scénario WORLD ART*: scénario incorporant un surcoût de production de la neige artificielle de 25% à cause de l’augmentation des températures.
6. *scénario WORLD SUB*: scénario incorporant une subvention publique égale à 10% des coûts de la neige artificielle. Dans le modèle, le financement de la subvention est assuré par un transfert forfaitaire. Ce scénario permet de tester l’effet de l’adaptation exogène qui prend, dans ce cas précis, la forme d’une subvention publique.

Quelque soit le scénario, la baisse simulée de la dotation en neige se base sur les valeurs du tableau 51 pour 2050 et plus spécialement sur les valeurs du “Model Mean”. A l’exception du scénario “WORLD SKIERS”, tous les autres scénarios se basent sur des variations de la dotation en neige qui ne prennent pas en compte l’adaptation des périodes de ski de la part des consommateurs. Les impacts économiques obtenus avec les six scénarios pour les deux segments touristiques de sports d’hiver et les ménages suisses sont présentés dans le tableau 52.

Tableau 52 – Six scénarios pour décrire les impacts économiques potentiels^a d’une baisse de l’enneigement naturel sur le secteur touristique et les ménages suisses en 2050.

	<i>CHE</i>	<i>CHE-</i>	<i>WORLD</i>	<i>WORLD</i>	<i>WORLD</i>	<i>WORLD</i>
				<i>SKIERS</i>	<i>ART</i>	<i>SUB</i>
<i>Winter overnight tourism</i>						
Production	-3.6%	-5.8%	-1.0%	-0.7%	-2.4%	0.3%
Exports ^b	-4.6%	-7.3%	-0.5%	-0.4%	-2.1%	1.1%
Imports ^c	3.5%	5.7%	-1.5%	-1.4%	-3.9%	-2.7%
Artificial snow	11.6%	0.0%	20.7%	16.8%	9.5%	28.4%
Production price	1.8%	2.9%	2.5%	2.0%	4.2%	1.9%
<i>One-day winter tourism</i>						
Production	-4.9%	-7.9%	-5.0%	-4.2%	-6.1%	-4.5%
Artificial snow	23.1%	0.0%	22.9%	19.7%	13.9%	27.3%
Production price	9.5%	16.0%	9.5%	7.8%	11.3%	8.6%
<i>Swiss household consumption</i>						
Ski overnight	-1.4%	-2.2%	-1.8%	-1.5%	-2.9%	-1.4%
Ski one day	-4.9%	-7.9%	-5.0%	-4.2%	-6.1%	-4.5%
Other tourism	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.2%	0.1%
Direct costs ^d	54	54	54	45	54	54
Welfare changes ^e	-17	-23	83	67	116	73

^a en écart en pourcentage par rapport au compte de référence

^b les exports = revenus générés par les touristes étrangers en Suisse

^c les imports = revenus générés par les touristes suisses à l’étranger

^d ces coûts s’obtiennent en multipliant la quantité de neige perdue par son prix ex-ante. Ils sont donnés en millions de francs suisse de 2010

^e en millions de francs suisse de 2010

Un des principaux enseignements de nos simulations est que la prise en compte de l’adaptation endogène amène à réévaluer à la baisse les coûts des changements climatiques pour le tourisme et l’économie suisse. En général, la différence entre les coûts directs et les “welfare changes” permet

d'estimer de combien les coûts des changements climatiques sont réduits grâce à l'adaptation endogène. Par exemple, l'adaptation endogène permet de réduire les coûts de 54 à 23 millions CHF dans le scénario "CHE-". Dans ce scénario, les segments suisses de sports d'hiver ne s'adaptent pas en augmentant leur production de neige artificielle par rapport à la baseline sans changement climatique. Dans le tableau 52, on peut ainsi voir que la variation de la quantité produite de neige artificielle dans le scénario "CHE-" est de 0% pour les deux segments de sports d'hiver. Nous relâchons cette contrainte dans le scénario "CHE" en permettant aux segments d'optimiser la quantité de neige produite. Cette quantité augmente de 11.6% pour le segment "winter overnight tourism" et de 23.1% pour le segment "one-day winter tourism". Nous estimons alors à 48.2 millions de CHF, dont 25.7 millions pour la neige artificielle, les coûts d'adaptation des segments de sports d'hiver dans le scénario "CHE" ⁵⁸. Comparé au scénario "CHE-", le scénario "CHE" offre plus de possibilités aux producteurs de s'adapter en leur permettant de substituer de la neige naturelle par de la neige artificielle. Ceci permet d'atténuer encore plus le choc initial lié à la baisse de l'enneigement. Il n'est donc pas surprenant que les effets économiques soient moindres dans le scénario "CHE". En effet, le surplus par rapport à la baseline passe de -23 à -17 millions CHF, soit un gain de 6 millions CHF, alors que la baisse de la production est fortement réduite dans les segments de sports d'hiver. Pour la neige artificielle, nous reconnaissons toutefois que nos estimations surestiment les gains de l'adaptation du fait que nos simulations ne prennent pas en compte les coûts externes environnementaux de sa production. D'autre part, il faut aussi noter que la hausse des températures rendra la production de neige artificielle plus onéreuse ce qui n'est pas pris en compte dans le scénario "CHE". Malgré le progrès technologique, il est probable que la production de neige à des températures plus élevées nécessitera plus d'énergie mais aussi plus de capital afin d'accroître la capacité des domaines skiables à produire des quantités importantes de neige en peu de temps. Nous introduisons ce facteur d'augmentation du prix de production dans le scénario "WORLD ART" dont nous comparerons ci-dessous les résultats avec ceux du scénario "WORLD".

Par rapport au scénario "CHE", le scénario "WORLD" étend la prise en compte des impacts des changements climatiques sur la dotation en neige naturelle aux autres régions du modèle. C'est une étape excessivement importante dans la modélisation des impacts des changements climatiques sur le secteur touristique, surtout pour un pays comme la Suisse où, comme le montre le tableau 62 de l'annexe E, la moitié de la consommation de ski serait le fait de skieurs étrangers. Une étude de l'OCDE (cf. [10]) a avancé l'hypothèse que la Suisse pourrait bénéficier à l'avenir du fait que les changements climatiques mettront en difficulté une proportion probablement plus grande de domaines skiables dans les autres pays de l'arc alpin. Cet effet viendrait alors alléger les coûts des changements climatiques pour l'industrie du ski en Suisse sans que toutefois rien ne soit dit sur son ampleur. Les impacts que nous avons dérivés à partir des données d'ENSEMBLES sont effectivement plus forts pour la région EUR que pour la région CH (cf. tableau 51) ce qui nous permet de confronter nos résultats avec cette hypothèse. Nos résultats non seulement soutiennent cette hypothèse mais permettent encore de la quantifier. La variation de surplus qui est négative avec le scénario "CHE" devient positive avec le scénario "WORLD" passant de -17 à +83 millions CHF soit un gain de 100 millions CHF. Les coûts d'adaptation sont alors égaux à 64.7 millions CHF pour les segments de sports d'hiver dont 43 millions rien que pour les coûts issus de la hausse de la production de neige artificielle. La dégradation des conditions d'enneigement à laquelle seront confrontés les domaines skiables situés en-dehors de

58. Le calcul de ces coûts d'adaptation se base sur la variation du coût unitaire de production (hors ressource en neige) entre le scénario "CHE" et la baseline. Le chiffre donné pour la neige artificielle correspond à la hausse des coûts de sa production par rapport à la baseline.

la Suisse aura un effet doublement positif sur l'économie suisse qui permet d'expliquer pourquoi le scénario "WORLD" non seulement est meilleur que le scénario "CHE" en termes de surplus des consommateurs mais encore pourquoi ce surplus augmente par rapport à la baseline. D'une part, la dégradation des conditions d'enneigements dans les autres régions du modèle entraîne une baisse des importations des ménages suisses pour la consommation de ski comme en atteste la variation des importations de -1.5% du segment "winter overnight tourism" ⁵⁹. D'autre part, elle permet de freiner la chute des exportations qui sont la conséquence directe des moins bonnes conditions d'enneigement en Suisse. On note ainsi que le volume des exportations du segment "winter overnight tourism" décroît de 0.5% dans le scénario "WORLD" alors qu'il décroît de 4.6% dans le scénario "CHE" ⁶⁰. Cela a des conséquences importantes pour la production de ce segment touristique puisqu'elle ne décroît plus que de 1.0% dans le scénario "WORLD" contre 3.6% dans le scénario "CHE". En revanche, la situation entre les deux scénarios est pratiquement inchangée en termes de production pour le segment "one-day winter tourism" car celui-ci ne peut pas bénéficier de cet effet positif via les exportations. Un point sensible du scénario "WORLD" à relever ici est que le secteur touristique suisse a pu tirer avantage des impacts des changements climatiques dans les autres régions du modèle du fait qu'il a été capable d'augmenter notablement sa production de neige artificielle. Cette production augmente de 20.7% dans le scénario "WORLD" pour le segment "winter overnight tourism" alors que l'augmentation n'est que de 11.6% dans le scénario "CHE". Par conséquent, la hausse de surplus calculée par le modèle pour le scénario "WORLD" se fait aussi au prix d'une consommation accrue de ressources naturelles par rapport à la baseline.

Le scénario "WORLD SKIERS" a pour but de prendre en compte le comportement adaptatif des skieurs qui déplaceront vraisemblablement les périodes auxquelles ils iront skier en fonction des conditions d'enneigement. Nous traduisons cette adaptation des skieurs en un impact des changements climatiques plus modéré sur la ressource en neige selon l'approche présentée ci-dessus dans la sous-section 9.6.1. En Suisse, la réduction de la dotation en neige en 2050 passe ainsi de -11.1% à -9.2% pour le segment "winter overnight tourism" et de -22.3% à -19.8% pour le segment "one-day winter tourism". La première chose à laquelle nous pouvons nous attendre de ce scénario est donc que la baisse de la consommation de ski de la part des ménages suisses soit plus faible que dans le scénario "WORLD". C'est bien ce que nous trouvons avec nos résultats: la baisse de consommation des ménages suisses pour les biens et services produits par le segment "winter overnight tourism" atteint 1.5% contre 1.8% dans le scénario "WORLD" (-4.2% versus -5.0% pour les biens et services du segment "one-day winter tourism"). Une seconde conséquence logique de cette adaptation des skieurs est le fait que les baisses de production des segments de sports d'hiver sont aussi plus contenues que dans le scénario "WORLD". En revanche, la variation de surplus est réduite de 16 millions CHF par rapport au scénario "WORLD". Ceci s'explique principalement par un effet lié au commerce extérieur. Bien que le volume des exportations du segment "winter overnight tourism" augmente dans le scénario "WORLD SKIERS" par rapport au scénario "WORLD" (-0.4% versus -0.5%), le prix auquel ces exportations sont vendues diminue quant à lui (+2.0% versus +2.5%) ce qui se traduit finalement par un manque à gagner pour l'économie suisse et par une baisse de surplus des consommateurs.

59. Il est vrai que cet effet positif est contrebalancé par le prix plus important à payer pour les importations restantes et aussi par la légère hausse des importations des biens et services touristiques en dehors des sports d'hiver.

60. Par rapport au scénario "CHE", la valeur des exportations dans le scénario "WORLD" augmente aussi à cause d'un prix de production plus élevé (+2.5% versus + 1.8% par rapport à la baseline).

Comme mentionné ci-dessus, nous avons aussi simulé les effets d’une hausse du prix de la neige artificielle par rapport à la baseline à l’aide du scénario “WORLD ART”. En 2050, cette augmentation du prix de la neige artificielle a été fixée à 25% de manière exogène. Pour les segments de sports d’hiver, ce scénario revient bien-sûr à réduire leur capacité d’adaptation. Le fait que la neige artificielle devienne plus chère rend son utilisation moins attractive ce qui se reflète dans des hausses des quantités produites de neige plus faibles que dans le scénario “WORLD”. Cette difficulté accrue à s’adapter aux nouvelles conditions d’enneigement a un impact négatif sur les niveaux de production qui baissent plus fortement que dans le scénario “WORLD”. L’impact au niveau de l’économie suisse est malgré tout largement positif avec un surplus estimé à +116 millions CHF. Plusieurs effets contribuent à la bonne évaluation du scénario “WORLD ART”. D’une part, l’augmentation de 4.2% du prix de production du segment “winter overnight tourism”, qui est la plus forte parmi l’ensemble des scénarios analysés, accroît fortement la valeur des exportations de ce segment. D’autre part, le volume des importations de ce même segment se voit réduit de 3.9%, une baisse importante en comparaison des autres scénarios, ce qui empêche aux valeurs des importations de prendre l’ascenseur⁶¹.

Enfin, le scénario “WORLD SUB” intègre une subvention de 10% sur les coûts de l’enneigement artificiel (uniquement pour la Suisse). Cette subvention facilite l’adaptation des segments suisses de sports d’hiver. La neige artificielle leur coûtant moins chère, ils en produisent plus que dans le scénario “WORLD” ce qui leur permet d’augmenter leur niveau de production par rapport à ce scénario. Au niveau des deux segments de sports d’hiver, l’introduction de la subvention a donc un effet positif: le segment “winter overnight tourism” augmente même légèrement son niveau de production par rapport à la baseline (+0.3%). Dans ce cas, le segment semble tirer un avantage compétitif de la subvention face aux concurrents étrangers puisque ses exports augmentent de 1.1%. En revanche, le financement de la subvention a un coût malgré le fait que celui-ci soit assuré, dans le modèle, par un transfert forfaitaire. Ces coûts sont aussi pris en compte dans la simulation et celle-ci montre que l’effet net de la subvention sur l’ensemble de l’économie suisse est négatif. Comparé au scénario “WORLD”, le surplus baisse en effet de 10 millions pour atteindre le montant de 73 millions de CHF. Deux facteurs influencent fortement l’ampleur de cette baisse de surplus. Il s’agit du montant total de la subvention ainsi que de sa distribution entre les deux segments de sports d’hiver. Sur ce deuxième point, on notera que subventionner la neige produite par le segment “winter overnight tourism” profite aussi, via une baisse du prix de production, aux consommateurs étrangers ce qui n’est pas le cas de la subvention sur la neige produite par le segment “one-day winter tourism”.

9.6.3 Analyse de sensibilité

Dans le but de tester la robustesse de nos résultats, nous avons effectué une analyse de sensibilité basée sur 45 simulations. Ces simulations se distinguent: 1/ par des valeurs différentes des élasticités de substitution liées à la capacité d’adaptation ainsi que par 2/ des impacts différents sur la ressource en neige. L’analyse de sensibilité est effectuée pour les élasticités de substitution qui sont importantes pour l’adaptation tant du côté de la demande que de l’offre:

61. Une piste pour expliquer ce fort recul des importations est le fait que les domaines skiables suisses restent, en moyenne pour 2050, moins équipés en équipements pour produire de la neige artificielle que la plupart de leurs concurrents européens et nord-américains. Ceci implique une variation à la hausse des prix de production des segments de sports d’hiver en Suisse qui est moins importante que dans les autres régions du modèle.

- les élasticités de substitution entre biens et services touristiques consommés (cf. Figure 20), respectivement σ^{htour} et σ^{htsnow} ,
- les élasticités de substitution entre facteurs de production (cf. Figure 10), respectivement σ et σ_s .

Pour chacun de ces deux ensembles d'élasticités, nous avons déterminé trois cas: le cas de référence (abrégé par Ref) qui correspond aux valeurs décrites dans les tableaux 12 et 14 ainsi que deux autres cas où les élasticités sont respectivement multipliées et divisées par deux. Ces cas sont notés S+ et S- lorsque ces changements s'appliquent aux élasticités côté offre, et D+ et D- lorsqu'ils s'appliquent aux élasticités du côté de la demande. Ces valeurs alternatives des élasticités sont combinées avec les cinq variations de la dotation en neige présentées dans le tableau 51 (cf. valeurs pour la Suisse de la colonne “% var” en 2050). Les résultats des 45 simulations en termes de production des deux segments touristiques de sports d'hiver sont présentés graphiquement à l'aide des figures 43 et 44.

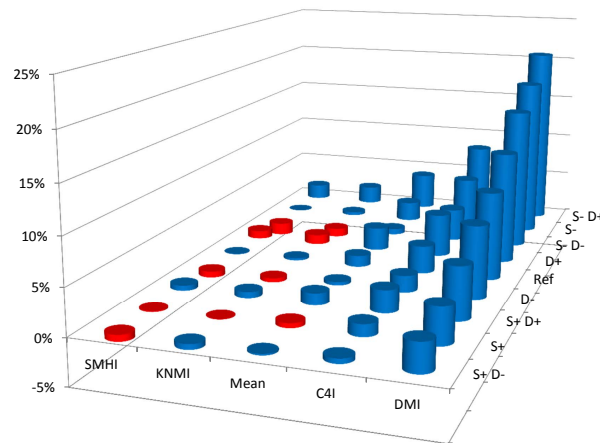


Figure 43 – Baisse en pourcent de la production du segment “winter overnight tourism” par rapport à la baseline (les cylindres rouges représentent des hausses de production).

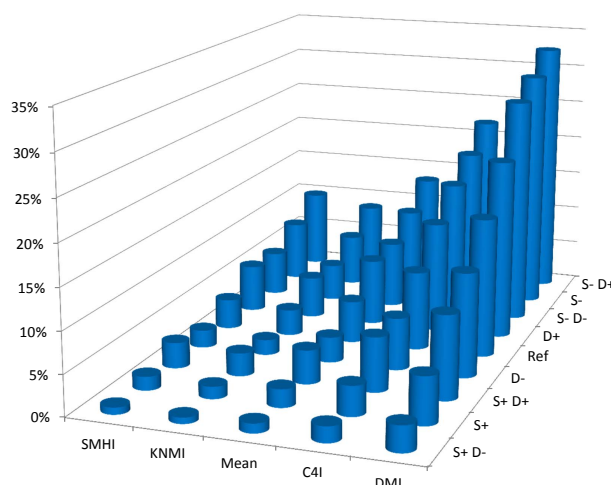


Figure 44 – Baisse en pourcent de la production du segment “one-day winter tourism” par rapport à la baseline.

Les variations de la production couvrent un spectre plus large dans le cas du segment “one-day winter tourism”. Ceci s’explique par des baisses plus fortes de l’enneigement naturel ainsi que par une capacité d’adaptation plus faible du côté de l’offre. Les impacts sur le segment “winter overnight tourism” sont aussi plus faibles parce qu’il bénéficie de la réallocation des skieurs qui s’opère au niveau international à cause des changements climatiques. Dans certains cas, la production de ce segment peut même augmenter en comparaison de la baseline. Cette situation apparaît avec les scénarios climatiques “SMHI” et “KNMI” où la baisse de l’enneigement en Suisse est plutôt limitée par rapport aux autres régions de modèle (cf. tableau 51).

Ces simulations mettent en évidence le rôle joué par les élasticités de substitution du côté de l’offre. En effet, la production apparaît très sensible à ces élasticités. Par conséquent, un élément important pour l’avenir sera la possibilité pour les segments de sports d’hiver de produire de la neige artificielle malgré un climat moins favorable. Dans le cas où cela s’avérerait difficile, les résultats de l’analyse de sensibilité montrent que l’impact de la baisse de l’enneigement naturel pourrait être beaucoup plus important pour l’économie et la société suisse.

10 Conclusion

Ce rapport final présente les travaux réalisés dans le cadre du projet “Modélisation de l’adaptation aux changements climatiques dans un modèle économique intégré”. Ceux-ci ont d’abord eu pour but d’identifier les secteurs les plus touchés par les changements climatiques en Suisse afin de les intégrer ou de les détailler dans GEMINI-E3, le modèle d’équilibre général du groupe de recherche en économie et management de l’environnement de l’EPFL. Grâce à ce travail préliminaire, la nouvelle version du modèle dispose d’une structure sectorielle très désagrégée pour la Suisse (28 secteurs). Ajoutée à l’introduction dans le modèle des ressources en eau et en neige, cette désagrégation sectorielle permet dorénavant d’utiliser le modèle GEMINI-E3 afin de simuler les conséquences des changements climatiques dans des domaines aussi variés que l’eau,

l'agriculture, l'énergie et le tourisme. Ce travail fournit donc une nouvelle contribution dans le domaine encore récent de l'utilisation des modèles d'équilibre général calculable afin d'estimer les coûts des changements climatiques. De surcroît, l'accent mis sur l'adaptation constitue un élément central de notre approche et apporte de la valeur ajoutée par rapport aux études existantes.

Dans ce travail, nous avons mesuré pour les secteurs de l'eau, de l'agriculture, de l'énergie et du tourisme, un grand nombre de grandeurs qui soulignent différents aspects des impacts et de l'adaptation aux changements climatiques. Il s'agit notamment des coûts directs, des coûts d'équilibre général (pertes de bien-être), des coûts d'adaptation (du côté des producteurs), des variations du prix et du niveau de production. Les coûts directs mesurent le choc ex-ante des changements climatiques sur l'économie alors que les coûts d'équilibre général mesurent leurs conséquences une fois que les acteurs économiques (consommateurs et producteurs) ont adapté leur processus de production ou leur consommation à la nouvelle situation. Nous nous référons à ce processus comme s'agissant de l'adaptation "endogène" par opposition à l'adaptation "exogène" qui est dictée par les pouvoirs publics. En règle générale, ces mécanismes de marché tendent à atténuer le choc ex-ante. Dans ce cas, les coûts directs sont supérieurs aux coûts d'équilibre général et la différence des deux est parfois utilisée pour mesurer les gains liés à l'adaptation endogène [19, 20]. Toutefois, c'est parfois l'inverse qui se produit avec des coûts directs plus faibles que les coûts d'équilibre général. C'est par exemple ce que nous avons mesuré dans le cas d'une baisse de la ressource en eau suite aux changements climatiques. L'eau étant très bon marché, les coûts directs sont faibles. De leur côté, les coûts d'équilibre général sont supérieurs car l'eau est difficilement substituable et la remplacer entraîne une réorganisation coûteuse pour l'économie et les consommateurs. Dans ce cas, nous utilisons une autre approche pour estimer les gains de l'adaptation endogène qui consiste à comparer le surplus de deux scénarios où la capacité d'adaptation des acteurs économiques varie très fortement. Tout au long de notre travail, cette approche a d'ailleurs été aussi utilisée pour mesurer les gains de mesures d'adaptation spécifiques, en comparant cette fois-ci le surplus de deux scénarios où une mesure spécifique est alternativement "activée" et "désactivée", ainsi que pour évaluer l'effet de mesures d'adaptation exogènes qui ont pris, dans notre travail, la forme de subventions favorisant l'adaptation des acteurs privés. En général, l'adaptation des marchés ne permet pas d'atténuer l'ensemble du choc initial des changements climatiques, c'est-à-dire qu'il reste un coût. Ces cas montrent que les politiques publiques visant à réduire les émissions ou à soutenir l'adaptation via des mesures d'adaptation exogènes font sens.

D'un point de vue quantitatif, l'effet positif lié à la baisse des besoins de chauffage domine largement les autres effets (+1 404 mio CHF). Cet effet positif sur l'économie suisse s'explique principalement par la réduction importante des importations d'agents énergétiques fossiles pour le chauffage. D'une part, les ménages en profitent pour augmenter leur niveau de consommation. D'autre part, les coûts de production de l'industrie et des services baissent, ce dont profitent également les ménages à travers une baisse des prix. Cet effet dépasse largement celui de la hausse des besoins de climatisation dont le coût n'est cependant pas négligeable (178 mio CHF). Ce résultat est similaire à ceux obtenus dans d'autres études pour la Suisse ou pour des pays qui ont un climat qui se rapproche du sien [9, 92]. En comparaison, la plupart des autres impacts n'ont qu'un effet limité sur l'économie suisse. Pour ces impacts, nos estimations donnent généralement des valeurs de coûts plus faibles que celles fournies par les études antérieures sur le sujet. Dans certains scénarios, nous obtenons même des coûts négatifs pour le tourisme. Ces résultats peuvent

s'expliquer de différentes manières. Premièrement, les scénarios climatiques que nous utilisons se basent sur le scénario moyen d'émissions A1B et nous prenons la moyenne de ceux-ci dans le cadre du scénario "Model Mean". Nous avons donc travaillé avec un changement climatique relativement modéré pour la période 2050. Il faut remarquer que notre scénario de référence a été construit sur une "storyline" comparable au scénario A1B, et que nos émissions de gaz à effet de serre sont par conséquent proches de ce scénario. Deuxièmement, notre approche intègre au maximum les effets liés à l'adaptation soit par le fonctionnement même du modèle GEMINI-E3 qui permet de prendre en compte les effets d'équilibre général, soit par la modélisation explicite de mesures d'adaptation dans les fonctions de production telles que la production de neige artificielle ou le recours à l'irrigation. Dans le tourisme, la prise en compte des impacts dans les autres régions du modèle est aussi un facteur central pour comprendre le gain estimé (+83 mio CHF). Selon nos estimations, la Suisse bénéficiera en effet de la manière dont les flux touristiques se modifieront suite aux impacts des changements climatiques qui toucheront les différentes régions de ski. On montre ainsi que, dans certains secteurs, il est dangereux d'évaluer les conséquences des changements climatiques en ne prenant en compte que les impacts au niveau national car les impacts à l'étranger peuvent avoir des conséquences importantes. Troisièmement, les méthodologies que nous avons choisies afin d'estimer l'impact du changement climatique peuvent aussi avoir joué un rôle en générant des estimations plus conservatrices que celles obtenues dans certaines études antérieures avec d'autres méthodologies (par ex. "statistical models" versus "process-based models" dans le cas de l'agriculture). Quatrièmement, certaines des hypothèses qui ont été utilisées afin de construire le scénario de référence sont peut-être exagérément optimistes ce qui a aussi contribué à atténuer les effets des changements climatiques (par ex. les hypothèses sur les coûts de production des énergies renouvelables).

Il faut aussi dire que nous n'avons pas modélisé tous les impacts des changements climatiques. Notre analyse n'est pas exhaustive tant en ce qui concerne les secteurs touchés (par ex. la santé) que les impacts des changements climatiques (par ex. les événements météorologiques extrêmes, les impacts sur les biens et services non-marchands comme la biodiversité, les écosystèmes). Dans les secteurs que nous avons traités, il manque également des impacts. Par exemple, les impacts directs sur la production maraîchère, fourragère et laitière n'ont pas été analysés dans le secteur agricole. Dans le secteur de l'énergie, l'effet du climat futur sur le potentiel de production des énergies renouvelables (hors hydraulique) n'a pas été étudié. Ceci explique pourquoi nous renonçons, sur la base des résultats que nous avons obtenus, à nous prononcer sur l'effet net des changements climatiques pour l'économie suisse.

Comme mentionné précédemment, une des forces de notre approche consiste à avoir intégré l'adaptation dans l'évaluation des effets économiques des changements climatiques. Pour la Suisse, cette démarche s'est avérée très importante et a permis de montrer les risques de surévaluer les coûts si on ne la prenait pas en compte. Ceci étant dit, il y a aussi un risque que nos simulations surestiment la capacité d'adaptation des acteurs économiques et le potentiel de réduction des coûts des changements climatiques. Toutefois, il est vrai que nous n'avons pas intégré dans notre analyse toutes les mesures possibles d'adaptation, loin s'en faut. D'un autre côté, le modèle GEMINI-E3 n'intègre pas non plus un certain nombre de phénomènes et/ou de contraintes qui freinent l'adaptation (par ex. barrières d'ordre légal, institutionnel, social ou politique). On notera également que l'adaptation est appréhendée au niveau sectoriel dans le modèle. Il n'est donc pas possible de modéliser certaines situations où les acteurs économiques sont amenés individuellement à sous-investir dans l'adaptation (présence de coûts fixes, de "spillover effects"). Cela a d'ailleurs aussi eu pour conséquence de restreindre le nombre

de mesures d'adaptation exogènes que nous pouvions analyser. Enfin, certaines mesures d'adaptation ont des coûts environnementaux, que nous ne prenons pas en compte, et qui peuvent amener à surestimer les bénéfices de l'adaptation.

* * * * *

* * *

Références

- [1] Les chiffres clés du tourisme de montagne en France : 7ème édition. Technical report, Observation, Développement et Ingénierie Touristique France (ODIT). [11](#), [51](#)
- [2] Major world crop areas and climatic profiles (revised). Agricultural Handbook 664, United States Department of Agriculture (USDA), Washington DC, 1994. [http ://www.usda.gov/oce/weather/pubs/Other/MWCACP/MajorWorldCropAreas.pdf](http://www.usda.gov/oce/weather/pubs/Other/MWCACP/MajorWorldCropAreas.pdf). [8](#), [87](#)
- [3] Die Energieperspektiven 2035 – Band 1 (Synthese) / Perspectives énergétiques pour 2035 – tome 1 (Synthèse). Technical report, Bundesamt für Energie / Office fédéral de l'énergie, Bern, 2007. [7](#), [41](#), [42](#)
- [4] Agriculture et sylviculture : Panorama. Technical report, Office fédéral de la statistique, février 2010. [30](#)
- [5] Schweizerische Gesamtenergiestatistik / Statistique globale suisse de l'énergie 2009. Technical report, Bundesamt für Energie / Office fédéral de l'énergie, Bern, 2010. [7](#), [41](#), [42](#)
- [6] Les effets du changement climatique sur l'utilisation de la force hydraulique — Rapport de Synthèse. Technical Report Matériaux pour l'Hydrologie de la Suisse, N° 38, 28 p., Société suisse d'hydrologie et de limnologie (SSHL) et Commission d'hydrologie (CHy) (éd.), Bern, 2011. [39](#)
- [7] Bruno Abegg. Klimaänderung und Tourismus — Klimafolgenforschung am Beispiel des Wintertourismus in den Schweizer Alpen. Technical report, Schlussbericht NFP 31. vdf, Zürich, 1996. [47](#)
- [8] Bernard Aebischer and Giacomo Catenazzi. Der Energieverbrauch der Dienstleistungen und der Landwirtschaft, 1990 - 2035 : Ergebnisse der Szenarien I bis IV und der zugehörigen Sensitivitäten BIP hoch, Preise hoch und Klima wärmer. Technical report, ETHZ-CEPE and Swiss Federal Office of Energy, Zurich and Bern, 2007. [41](#), [43](#)
- [9] Bernard Aebischer, Giacomo Catenazzi, George Henderson, and Martin Jakob. Impact of climate change on thermal comfort, heating and cooling energy demand in Europe. In *Saving energy - just do it!* European Council for an Energy Efficient Economy ECEEE, 2007. [8](#), [99](#), [100](#), [131](#)
- [10] Shardul Agrawala, Bruno Abegg, Simon Jetté-Nantel, Florence Crick, and Anne de Montfalcon. *Climate Change in the European Alps : Adapting Winter Tourism and Natural Hazards Management*. OECD, Paris, 2007. [47](#), [48](#), [126](#)
- [11] K.J. Arrow, H.B. Chenery, B.S. Minhas, and R.M. Solow. Capital-labor substitution and economic efficiency. *Review of Economics and Statistics*, 43 :225–250, 1961. [28](#), [65](#)
- [12] Thomas Baumann and Ueli Schiess. Compte satellite du tourisme de la Suisse, 2001 et 2005 : Principes, méthode et résultats. Technical report, Office fédéral de la statistique (OFS), Neuchâtel, 2008. [11](#), [46](#), [56](#), [57](#)
- [13] Walter Baumgartner, Orsi Ebert, and Felix Weber. Der Energieverbrauch der Industrie, 1990 - 2035 : Ergebnisse der Szenarien I bis IV und der zugehörigen Sensitivitäten BIP hoch, Preise hoch und Klima wärmer. Technical report, Basics AG and Swiss Federal Office of Energy, Basel and Bern, 2006. [43](#)

- [14] Martin Beniston, David Stephenson, Ole Christensen, Christopher Ferro, Christoph Frei, Stéphane Goyette, Kirsten Halsnaes, Tom Holt, Kirsti Jylhä, Brigitte Koffi, Jean Palutikof, Regina Schöll, Tido Semmler, and Kat Woth. Future extreme events in European climate : an exploration of regional climate model projections. *Climatic Change*, page 71–95, 2007. 44
- [15] Maria Berrittella, Katrin Rehdanz, and Richard S.J. Tol. The Economic Impact Of Restricted Water Supply : A Computable General Equilibrium Analysis. *Research unit Sustainability and Global Change, Hamburg University Working Paper*, FNU-93, 2006. 35
- [16] Thomas Bieger, Thomas Riklin, and Catherine Baudenbacher. Umfrage zur aktuellen Situation und zu den wirtschaftlichen Perspektiven der Beschneidung in der Schweiz. Universität St.Gallen, Institut für Öffentliche Dienstleistungen und Tourismus, März 2009. 7, 51
- [17] Leticia Blázquez, Nina Boogen, and Massimo Filippini. Residential electricity demand for Spain : new empirical evidence using aggregated data. CEPE Working Paper No. 82, February 2012. URL http://www.cepe.ethz.ch/publications/workingPapers/CEPE_WP82.pdf. 97
- [18] BLW. Agrarbericht 2007. Technical report, BLW, 2007. 26
- [19] Francesco Bosello, Roberto Roson, and Richard S. J. Tol. Economy-wide estimates of the implications of climate change : Sea level rise. *Environmental & Resource Economics*, 37 : 549–571, 2007. 131
- [20] Francesco Bosello, Fabio Eboli, and Roberta Pierfederici. Assessing the economic impacts of climate change. Technical report, Fondazione Eni Enrico Mattei (FEEM), 2012. 131
- [21] Bundesamt für Energie BFE. Grundlagen für die Energiestrategie des Bundesrates ; Frühjahr 2011, Aktualisierung des Energieperspektiven 2035. Technical report, Schweizerische Eidgenossenschaft, 2011. 7, 69, 70
- [22] Rolf Bürki. Klimaänderung und Anpassungsprozesse im Tourismus — dargestellt am Beispiel des Wintertourismus. Technical report, Publikation der Ostschweizerischen Geographischen Gesellschaft NF H 6, St. Gallen, 2000. 47
- [23] BUWAL, BWG, and MeteoSchweiz. Auswirkungen des Hitzesommers 2003 auf die Gewässer. Technical report, BUWAL and BWG and MeteoSchweiz, 2004. 24
- [24] Nathani C., Sutter D., van Nieuwkoop R., Peter M., Kraner S., Holzhey M., Rütter H., and Zandonella R. Energy related disaggregation of the Swiss Input-Output Table. Technical report, SFOE, EWG Publication, Bern, 2011. 20
- [25] Pierluigi Calanca and Jürg Fuhrer. Swiss agriculture in a changing climate : Grassland production and its economic value. In Alain Haurie and Laurent Viguier, editors, *The Coupling of Climate and Economic Dynamics — Essays on Integrated Assessment*, volume 22 of *Advances in Global Change Research*, pages 341–353. Springer, 2005. 31
- [26] CH2011. Swiss climate change scenarios CH2011. Technical report, C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC, 2011. 21, 68, 106

- [27] M. Christenson, H. Manz, and D. Gyalistras. Climate warming impact on degree-days and building energy demand in Switzerland. *Energy Conversion and Management*, 47 : 671–686, 2006. 97, 98
- [28] Leon Clarke, Jae Edmonds, Volker Krey, Richard Richels, Steven Rose, and Massimo Tavoni. International climate policy architectures : Overview of the EMF 22 International Scenarios. *Energy Economics*, 31(Supplement 2) :S64 – S81, 2009. ISSN 0140-9883. doi : DOI:10.1016/j.eneco.2009.10.013. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V7G-4XHVH34-2/2/67f06e207a515adba42f7455a99f648e>. International, U.S. and E.U. Climate Change Control Scenarios : Results from EMF 22. 74
- [29] B. V. Dimaranan. *Global Trade, Assistance, and Production : The GTAP 6 Data Base*. Center for Global Trade Analysis Purdue University, Center for Global Trade Analysis, Purdue University, December 2006. 33
- [30] John Dimitropoulos. Energy productivity improvements and the rebound effect : An overview of the state of knowledge. *Energy Policy*, 35(12) :6354 – 6363, 2007. ISSN 0301-4215. doi : 10.1016/j.enpol.2007.07.028. 104
- [31] Arbeitsgemeinschaft Ecoplan/Sigmaplan. Auswirkungen der Klimaänderung auf die Schweizer Volkswirtschaft (nationale Einflüsse). Technical report, Swiss Federal Office for the Environment and Swiss Federal Office of Energy, Bern, 2007. 18, 39, 47, 115
- [32] Energy Information Administration. International Energy Outlook. Technical report, U.S. Department of Energy, september 2011. 7, 69, 70
- [33] Gunnar S. Eskeland and Torben K. Mideksa. Electricity demand in a changing climate. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 15 :877–897, 2010. 97
- [34] Eurostat. Europe in figures — eurostat yearbook 2008. Technical report, eurostat — European commission, 2008. 59
- [35] Eurostat. Tourism Satellite Accounts (TSA) in Europe. Technical report, European commission, 2010. 59
- [36] Office fédéral de la statistique. Comportement en matière de voyages de la population résidente suisse, en 2003. Module Tourisme de l’enquête sur les revenus et la consommation 2003 (ERC03). Technical report, Office fédéral de la statistique, Neuchâtel, December 2005. ACTUALITES OFS. 59
- [37] Robert Finger. *Climate change impacts and adaptation in Swiss cereal production : integrating biophysical and economic modelling*. PhD thesis, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2009. 31, 32
- [38] Robert Finger and Stephanie Schmid. The impact of climate change on mean and variability of Swiss corn production. *Schriftenreihe der Gruppe Agrar-, Lebensmittel und Umweltökonomie, ETH Zürich*, 2007/1, 2007. 27
- [39] Matthias Freiburghaus. Wasserbedarf der Schweizer Wirtschaft. Technical report, Schweizerische Verein des Gas- und Wasserfaches (SVGW), 2009. 22, 25, 26, 27, 28, 29, 76
- [40] J. Fuhrer, M. Beniston, A. Fischlin, Ch. Frei, S. Goyette, K. Jasper, and Ch. Pfister. Climate risks and their impact on agriculture and forests. *Climatic Change*, pages 79–102, 2006. 40

- [41] Juerg Fuhrer. Abschaetzung des Bewaesserungsbedarfs in der Schweizer Landwirtschaft. Technical report, Forschungsanstalt ART, 2010. [23](#)
- [42] Peter Furger. L’avenir des remontées mécaniques des Alpes vaudoises. Technical report, Service de l’économie et du tourisme du Département de l’économie du Canton de Vaud, 2002. [52](#)
- [43] Brigitta Gander. Climate change and water suppliers : Informations and adaptation strategies. *GWA*, 89 :241–249, 2009. [23](#)
- [44] Ludovic Gaudard. Conséquences des changements climatiques sur les déclenchements du réseau électrique suite aux chutes de branches provoquées par le vent. Master’s thesis, Université de Genève, 2009. [44](#)
- [45] Carlos M. Gomez, Dolores Tirado, and Javier Rey-Maquiera. Water exchanges versus water works : Insights from a general equilibrium model foe the Balearic Islands. *Water Resources Research*, 40, 2004. [28](#), [29](#)
- [46] Camille Gonseth. *Adapting ski area operations to a warmer climate in the Swiss Alps through snowmaking investments and efficiency improvements*. PhD thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2008. [50](#)
- [47] Camille Gonseth and Cecilia Matasci. Analysis of the sensitivity of ski tourism demand to climate change in Switzerland. In Axel Borsdorf, Johann Stötter, and Eric Veulliet, editors, *Managing Alpine Future II — Proceedings of the Innsbruck Conference November 21-23, 2011*, IGF Research Reports, pages 257–267. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, 2011. [62](#)
- [48] D. Jay Goodman. More Reservoirs or Transfers? A Computable General Equilibrium Analysis of Projected Water Shortages in the Arkansas River Basin. *Journal of Agricultural and Resource Economics*, 25(2) :698–713, 2000. [29](#)
- [49] Klaus Grabler and Jan Stirnweis. Wirtschaftsbericht der Seilbahnen : Trends Winter 2009/2010, 2010. URL www.manova.at. [12](#), [120](#)
- [50] Eric S. Griffith and Steven L. Zemanek. U.s. travel and tourism satellite accounts for 2005–2008. Technical report, U.S. Department of Commerce, Bureau of Economic Analysis, June 2009. URL http://www.bea.gov/industry/tourism_data.htm. [59](#)
- [51] Chris D. Hewitt and Davis J. Griggs. Ensembles-based predictions of climate changes and their impacts. *EOS*, 85(52), 2004. [67](#)
- [52] Peter Hofer. Der Energieverbrauch der Privaten Haushalte, 1990 - 2035 : Ergebnisse der Szenarien I bis IV und der zugehörigen Sensitivitäten BIP hoch, Preise hoch und Klima wärmer. Technical report, Prognos AG and Swiss Federal Office of Energy, Basel and Bern, 2007. [42](#), [98](#)
- [53] A. Holzkämper, P. Calanca, and J. Fuhrer. Analyzing climate effects on agriculture in time and space. In Elsevier, editor, *Spatial Statistics 2011*, volume 3 of *Procedia Environmental Sciences*, pages 58–62, 2011. [8](#), [87](#)

- [54] Pascal Horton, Bettina Schaeffli, Abdelkader Mezghani, Benoît Hingray, and André Musy. Prediction of climate change impacts on Alpine discharge regimes under A2 and B2 SRES emission scenarios for two future time periods (2020-2049, 2070-2099). Technical report, Swiss Federal Office of Energy, Energy policy fundamentals, Bern, 2005. 22, 37, 39
- [55] Pascal Horton, Bettina Schaeffli, Abdelkader Mezghani, Benoît Hingray, and André Musy. Assessment of climate-change impacts on alpine discharge regimes with climate model uncertainty (2070-2099). *Hydrological Processes*, 20 :2091–2109, 2006. 22, 37
- [56] Ronald H. Howell, Harry J. Sauer, and William J. Coad. *Principles of heating, ventilating, and air conditioning*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA., 2005. 98
- [57] International Energy Agency. *World Energy Outlook 2010*. 2010. 69
- [58] Morna Isaac and Detlef P. van Vuuren. Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change. *Energy Policy*, 37 (2) :507 – 521, 2009. ISSN 0301-4215. doi : 10.1016/j.enpol.2008.09.051. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421508005168>. 97
- [59] Mario Keller. Der Energieverbrauch des Verkehrs : Ergebnisse der Szenarien I bis IV und der zugehörigen Sensitivitäten BIP hoch, Preise hoch und Klima wärmer. Technical report, Infras and Swiss Federal Office of Energy, Zurich and Bern, 2007. 43
- [60] Almut Kirchner. Die Energieperspektiven 2035 - Band 2 - Szenarien I bis IV. Technical report, Prognos AG and Swiss Federal Office of Energy, Basel and Bern, 2007. 42
- [61] Almut Kirchner, Andreas Kemmler, Peter Hofer, Mario Keller, Martin Jakob, and Giacomo Catenazzi. Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000–2009 nach Verwendungszwecken. Technical report, Bundesamt für Energie BFE, Dezember 2010. 8, 96, 97, 98, 100, 102
- [62] Christian Laesser. Die Pistentage der Schweizer Bevölkerung — Eine erste Schätzung. *IDT-Blickpunkt*, 8 :2–3, Mai 2003. Universität St.Gallen. 59, 118
- [63] F. Laufer, S. Grötzinger, M. Peter, and A. Schmutz. Ausbaupotential der Wasserkraft. Technical report, Swiss Federal Office of Energy., 2004. 39
- [64] Kristin Linnerud, Torben K. Mideksa, and Gunnar S. Eskeland. The Impact of Climate Change on Nuclear Power Supply. *The Energy Journal*, 32(1) :149–168, 2011. 110, 111, 112
- [65] David B. Lobell and Marshall B. Burke. Why are agricultural impacts of climate change so uncertain? the importance of temperature relative to precipitation. *Environmental Research Letters*, 3, 2008. 31
- [66] David B. Lobell and Marshall B. Burke. On the use of statistical models to predict crop yield responses to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150 :1443–1452, 2010. 31
- [67] David B. Lobell and Christopher B. Field. Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming. *Environmental Research Letters*, 2, 2007. 31

- [68] David B. Lobell, Marshall B. Burke, Claudia Tebaldi, Michael D. Mastrandrea, Walter P. Falcon, and Rosamond L. Naylor. Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030. *Science*, 319 :607–610, 2008. [31](#)
- [69] David B. Lobell, Wolfram Schlenker, and Justin Costa-Roberts. Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, 333 :616–620, 2011. [31](#), [86](#), [90](#), [149](#)
- [70] John Maulbetsch. Comparison of Alternate Cooling Technologies for California Power Plants : Economic, Environmental and Other Tradeoffs. Technical report, EPRI and California Energy Commission, Palo Alto and Sacramento, CA, 2002. [40](#)
- [71] Ruedi Meier. Sozioökonomische Aspekte von Klimaänderungen und Naturkatastrophen in der Schweiz. Technical report, vdf Hochschulverlag, ETH Zürich, Zürich, 1998. [23](#), [24](#), [47](#)
- [72] Hansruedi Müller and Fabian Weber. Klimaänderung und Tourismus : Szenarienanalyse für das Berner Oberland 2030. Technical report, Forschungsinstitut für Freizeit und Tourismus (FIF) der Universität Bern, Bern, 2007. [47](#)
- [73] Théodore Muller. Auswertung der Daten über die Milchproduktion : Milchjahr 2006/2007. Technical report, BLW, 2008. [26](#)
- [74] OcCC. *Le climat change - que faire ? Le nouveau rapport du GIEC et les conséquences pour la Suisse*. OcCC, 2008. [22](#)
- [75] OcCC and ProClim. Climate change and Switzerland 2050 : Expected impacts on environment, society and economy. Technical report, Organe consultatif sur les changements climatiques, Berne, 2007. [22](#), [24](#), [37](#), [39](#), [40](#), [41](#)
- [76] OECD. OECD Tourism Trends and Policies 2010. Technical report, OECD, 2010. [59](#)
- [77] OMT. Recommandations sur les statistiques du tourisme. Technical report, Organisation Mondiale du Tourisme (OMT), Nations Unies (ONU), 1994. [46](#)
- [78] Intergovernmental Panel on Climate Change. *Emissions Scenarios*. Cambridge University Press, 2000. [67](#), [69](#)
- [79] Intergovernmental Panel on Climate Change. *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 2007. [22](#)
- [80] Cleo Paskal. The Vulnerability of Energy Infrastructure to Environmental Change. Technical report, Chatham House (the Royal Institute of International Affairs), London, 2009. [44](#)
- [81] Frank Peters, David M. Livingstone, Gerrit-Hein Goudsmit, Rolf Kipfer, and Richard Forster. Modeling 50 years of historical temperature profiles in a large central European lake. *Limnology and Oceanography*, 47(1) :186–197, 2002. [23](#)
- [82] Michel Piot. Auswirkungen der Klimaerwärmung auf die Wasserkraftproduktion in der Schweiz. *Wasser Energie Luft. Eau énergie air*, 11/12 2005. [39](#)
- [83] Michel Piot. Einfluss der Klimaerwärmung auf das Energiesystem in Energieperspektiven 2035 – Band 4 Exkurse. Technical report, Swiss Federal Office of Energy, Bern, 2007. [37](#)

- [84] Arnaud Reynaud. An Econometric Estimation of Industrial Water Demand in France. *Environmental and Resource Economics*, 25 :213–232, 2003. 29, 30
- [85] Heinz Rütter, Hansruedi Müller, Doris Guhl, and Jürg Stettler. Tourismus im Kanton Bern : Wertschöpfungsstudie. Technical report, Forschungsinstitut für Freizeit und Tourismus (FIF) der Universität Bern, 1995. 10, 58, 158
- [86] Heinz Rütter, Adrian Berwert, Ursula Rütter-Fischbacher, and Michael Landolt. Der Tourismus im Wallis : Wertschöpfungsstudie. Technical report, Finanz- und Volkswirtschaftsdepartement des Kantons Wallis, Dienststelle für Tourismus- und Wirtschaftsförderung, 2001. 10, 47, 58, 158
- [87] Heinz Rütter, Adrian Berwert, Ursula Rütter-Fischbacher, and Sabine Schneiter. L’importance du tourisme pour l’économie vaudoise. Technical report, Etat de Vaud : Département de l’économie (DEC), Service de l’économie, du logement et du tourisme (SELT), 2004. 10, 158
- [88] André Sceia, Philippe Thalmann, and Marc Vielle. Assessment of the economic impacts of the revision of the Swiss CO2 law with a hybrid model. Technical report, 2009. URL <http://www.bafu.admin.ch/klima/00509/00511/index.html?lang=de>. 65
- [89] Christoph Schär, Pier Vidale, Daniel Lüthi, Christoph Frei, Christian Häberli, Mark Lini-ger, and Christof Appenzeller. The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature*, pages 332–336, 2004. 40
- [90] Seilbahnen Schweiz (SBS). Fakten und Zahlen, 2008. 50
- [91] Daniel Scott and Geoff McBoyle. Climate change adaptation in the ski industry. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 12 :1411–1431, 2007. 7, 49
- [92] Pernille Seljom, Eva Rosenberg, Audun Fidje, Jan Erik Haugen, Michaela Meir, John Rekstad, and Thore Jarlset. Modelling the effects of climate change on the energy system — a case study of Norway. *Energy Policy*, 39(11) :7310 – 7321, 2011. ISSN 0301-4215. doi : 10.1016/j.enpol.2011.08.054. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421511006513>. 97, 131
- [93] Gaëlle Serquet and Martine Rebetez. Relationship between tourism demand in the swiss alps and hot summer air temperatures associated with climate change. *Climatic Change*, 108 :291–300, 2011. 47
- [94] Chang K. Seung, Thomas R. Harris, Thomas R. Mac Diarmid, and W. Douglass Shaw. Economic impacts of water reallocation : a CGE analysis for the Walker river basin of Nevada and California. *The Journal of Regional Analysis and Policy*, 28,2 :13–34, 1998. 35
- [95] SGWA. Statistische Erhebungen der Wasserversorgungen in der Schweiz 2000. Technical report, SGWA, 2009. 22, 25, 27
- [96] Statistics Canada. Canadian tourism satellite account, 2004. Technical report, Income and Expenditure Accounts Division, Statistics Canada, December 2009. URL http://www.statcan.gc.ca/access_acces/alternative_alternatif.action?l=eng&loc=/pub/13-604-m/13-604-m2009063-eng.pdf. 59

- [97] J.R.N. Stone. Linear Expenditure Systems and Demand Analysis : An Application to the Pattern of British Demand. *Economic Journal*, 64 :511–527, 1983. [65](#)
- [98] Daniele Torriani, Pierluigi Calanca, Markus Lips, Helmut Ammann, Martin Beniston, and Jürg Fuhrer. Regional assessment of climate change impacts on maize productivity and associated production risk in Switzerland. *Regional Environmental Change*, 7 :209–221, 2007. [31](#)
- [99] Daniele Simone Torriani, Pierluigi Calanca, Stéphanie Schmid, Martin Beniston, and Jürg Fuhrer. Potential effects of changes in mean climate and climate variability on the yield of winter and spring crops in Switzerland. *Climate Research*, 34 :59–69, June 2007. [31](#), [32](#)
- [100] Bastienne Uhlmann, Stéphane Goyette, and Martin Beniston. Sensitivity analysis of snow patterns in Swiss ski resorts to shifts in temperature, precipitation and humidity under conditions of climate change. *International Journal of Climatology*, 29 :1048–1055, 2009. [47](#)
- [101] Laurent Vanat. Rapport international sur le tourisme de montagne 2010 : Panorama des chiffres-clés des stations de ski, Mai 2010. [9](#), [52](#), [156](#)
- [102] Michael Weber and Andreas Schild. Stand der Bewässerung in der Schweiz-Bericht zur Umfrage 2006. Technical report, BLW, 2007. [26](#), [77](#)
- [103] M. Würsten, P. G. Dändliker, T. Schöni, S. Gerster, C. Mathez, and J. Aeschbacher. Bericht zum Trockenjahr 2003. Solothurn : Amt für Umwelt des Kantons Solothurn. Technical report, 2004. [39](#)
- [104] WSL. Projekt CCHydro, Teilprojekt Natürlicher Wasserhaushalt der Schweiz und ihrer bedeutendsten Gross-Einzugsgebiete, Leitung : Massimiliano Zappa. <http://www.bafu.admin.ch/wasser/01444/01991/10443/index.html?lang=de>. [12](#), [22](#), [75](#), [76](#)
- [105] Roland Zegg and Regina Gujan. Branchenanalyse, Wertschöpfungswirkungen und Kennzahlen der Bergbahnunternehmen im Kanton Bern 2000/01 im Vergleich mit 1996/97. Technical report, Grischconsulta AG, Chur, August 2003. [7](#), [50](#)
- [106] Klaus Zurschmitten and Stefan Gehrig. Die Bergbahnen im Kanton Wallis : Analyse, Entwicklungsperspektiven und Strategien. Technical report, Kanton Wallis, Departement für Volkswirtschaft, Institutionen und Sicherheit, Dienststelle für Tourismus und Regionalentwicklung, 2004. [7](#), [50](#)

Annexes

A Personnes contactées et/ou auditionnées

- Jan BEGUIN (Office fédéral de l’agriculture OFAG)
- Pierluigi CALANCA (Agroscope Reckenholz-Tänikon ART)
- Prof. Patrick CRIQUI (LEPHE — Université de Grenoble)
- Robert FINGER (ETH Zürich — Agri-food and Agri-environmental Economics Group)
- Matthias FREIBURGHAUS (Société Suisse de l’Industrie du Gaz et des Eaux SSIGE)
- Ludovic GAUDARD (Université de Genève)
- Sven KOLTARSKI (ETH Zürich)
- Therese LEHMANN (Universität Bern - Forschungsinstitut für Freizeit und Tourismus)
- Arnaud DE LORIOLE (Office fédéral de l’agriculture OFAG)
- Nicolas MOREL (EPFL — Laboratoire d’énergie solaire et de physique du bâtiment LESO-BP)
- Prof. Hansruedi MÜLLER (Universität Bern — Forschungsinstitut für Freizeit und Tourismus)
- Didier PELLET (Agroscope Changins-Wädenswil ACW)
- Bettina SCHAEFLI (EPFL)
- Andreas SCHILD (Office fédéral de l’agriculture OFAG)
- Marc SURCHAT (Secrétariat d’Etat à l’économie SECO)
- Silvana MIMA (LEPHE — Université de Grenoble)
- Bastienne UHLMANN (Université de Genève)
- Laurent VANAT (Laurent Vanat Consulting SARL)
- Massimiliano ZAPPA (Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL)

B La nouvelle nomenclature sectorielle

Tableau 53 – Nouvelle nomenclature sectorielle du modèle GEMINI-E3

1	Coal
2	Oil
3	Gas
4	Petroleum Products
5	Electricity
6	Crop
7	Milk
8	Animal product
9	Vegetables
10	Other agricultural products
11	Forestry
12	Mineral product
13	Chemical
14	Metal and Metal products
15	Paper products publishing
16	Transport nec
17	Sea Transport
18	Air Transport
19	Consuming goods
20	Equipment goods
21	Winter overnight Tourism
22	Winter one-day Tourism
23	Other Tourism
24	Insurance and pension funding
25	Health and social work
26	Services
27	Dwelling
28	Water

C Secteur agricole

C.1 Résultats des régressions des modèles de rendement de trois cultures

Tableau 54 – Coefficients estimés par régressions de données historiques et décrivant la sensibilité du rendement du blé, du maïs grain et de l’orge aux conditions climatiques (température et précipitations).

	Barley		Barley		Maize		Maize		Wheat	
	UDeI	CRU	CRU ¹	UDeI	CRU	CRU ¹	UDeI	CRU	CRU ¹	CRU
<i>Dep.Var. : ln Yield</i>										
<i>Tavg</i>	0.031** [0.012]	0.042*** [0.012]		0.35** [0.13]	0.43*** [0.092]		0.12*** [0.027]	0.11*** [0.034]		
<i>Tavg</i> ²	-0.0032** [0.0012]	-0.0038*** [0.0013]		-0.012** [0.0042]	-0.013*** [0.0030]		-0.0060*** [0.0011]	-0.0050*** [0.0013]		
<i>Precip</i>	0.0017* [0.00093]	0.0013 [0.0014]	0.0020 [0.0015]	0.0041 [0.0025]	0.0068* [0.0035]	0.0049 [0.0044]	0.00032 [0.0015]	0.00068 [0.00089]	0.00071 [0.00087]	
<i>Precip</i> ²	-0.000017*** [5.0e-06]	-0.000020* [9.6e-06]	-0.000022** [1.0e-05]	-0.000011 [0.000012]	-0.000028* [0.000015]	-0.000020 [0.000018]	-0.000010 [7.3e-06]	-0.000016*** [4.7e-06]	-0.000016*** [4.5e-06]	
<i>Tmin</i>			0.012 [0.010]			0.047 [0.14]			0.0092 [0.019]	
<i>Tmin</i> ²			-0.0063*** [0.0017]			-0.0011 [0.0065]			-0.0015 [0.0010]	
<i>Tmax</i>			-0.019 [0.027]			0.38* [0.19]			0.12*** [0.034]	
<i>Tmax</i> ²			0.0016 [0.0013]			-0.0094* [0.0048]			-0.0036*** [0.00096]	
Observations	651	549	549	473	392	392	665	560	560	
Countries	17	17	17	14	14	14	18	18	18	
<i>R</i> ²	0.907	0.912	0.914	0.846	0.843	0.844	0.928	0.936	0.937	
<i>Prob</i> > <i>F</i> 1	0.045	0.0100	0.012	0.010	0.0013	0.00068	7.1e-06	0.00052	0.0013	
<i>Prob</i> > <i>F</i> 2	0.0013	0.0031	0.022	0.064	0.19	0.56	0.0018	1.1e-06	2.8e-06	

Tous les modèles sont estimés avec des effets fixes et des trends temporels quadratiques qui sont spécifiques à chaque pays.

Des “clustered-robust standard errors at the country level” sont utilisés: *significatif au niveau de 10%; **significatif au niveau de 5%; ***significatif au niveau de 1%.

Nous testons les hypothèses jointes suivantes:

1/ les coefficients liés à la température sont égaux à zéro (cf. p-value de la F-statistic F1)

2/ les coefficients liés aux précipitations sont égaux à zéro (cf. p-value de la F-statistic F2)

¹ *Tmin* et *Tmax* uniquement disponibles avec la base de données du Climate Research Unit (CRU).

C.2 Evolution des rendements agricoles en Suisse à l'horizon 2090

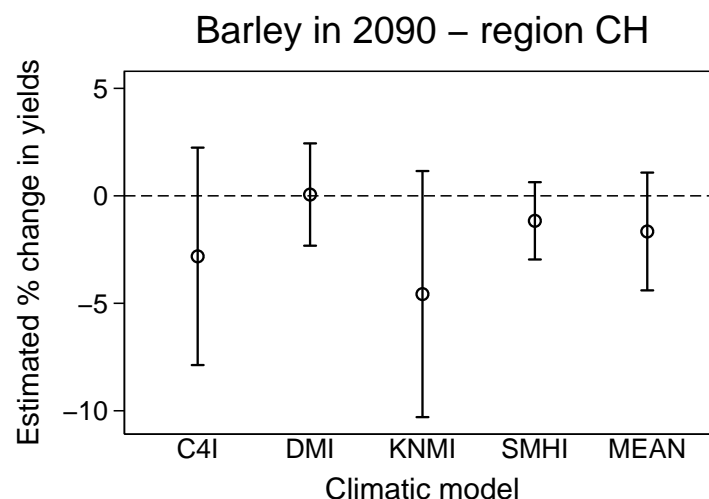


Figure 45 – Estimation de l'impact des changements climatiques sur le rendement de l'orge en Suisse à l'horizon 2090 par rapport à la période de référence 1961–1990 (effets via une modification des températures et des précipitations).

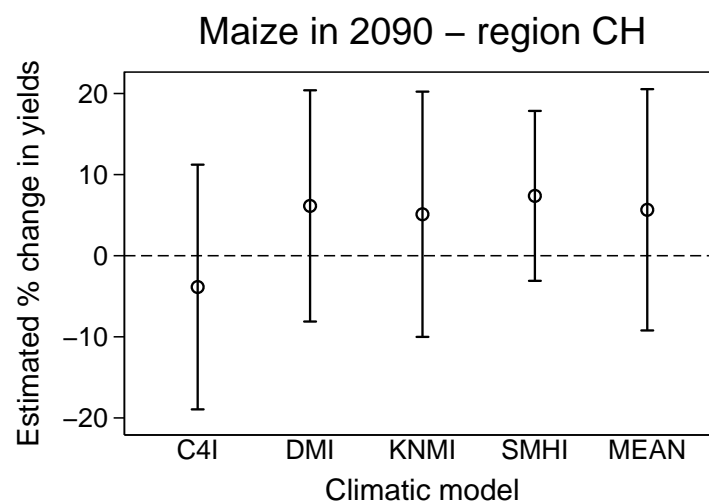


Figure 46 – Estimation de l'impact des changements climatiques sur le rendement du maïs grain en Suisse à l'horizon 2090 par rapport à la période de référence 1961–1990 (effets via une modification des températures et des précipitations).

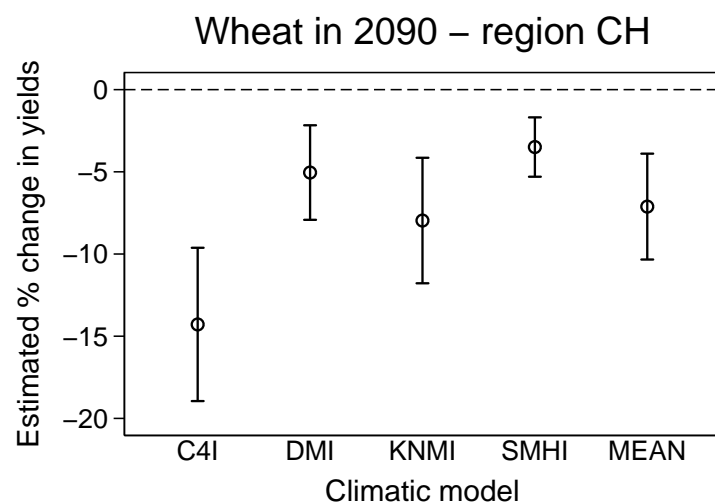


Figure 47 – Estimation de l’impact des changements climatiques sur le rendement du blé en Suisse à l’horizon 2090 par rapport à la période de référence 1961–1990 (effets via une modification des températures et des précipitations).

Tableau 55 – Résultats de l’analyse de l’impact des changements climatiques en 2090 sur les rendements du blé, du maïs grain et de l’orge en distinguant les effets liés aux températures de ceux liés aux précipitations.

Climatic Model	Crop	Temperature (°C)		Precipitation (mm/month)		Yield impact of		
		T_{ref}^{\dagger}	ΔT^{\ddagger}	P_{ref}^{\dagger}	ΔP^{\ddagger}	Temp. %var	Prec. %var	Total %var
Model Mean	Wheat	10.4	3.3	130.9	-7.0	-8.5	1.6	-7.1
	Maize	12.0	3.6	124.7	-6.2	6.7	-1.0	5.7
	Barley	3.3	3.2	106.0	7.8	-0.2	-1.5	-1.7
C4I	Wheat	10.4	4.8	130.9	-8.5	-15.9	1.9	-14.3
	Maize	12.0	5.5	124.7	-9.2	-2.4	-1.5	-3.9
	Barley	3.3	4.9	106.0	-0.8	-2.9	0.1	-2.8
DMI	Wheat	10.4	2.8	130.9	-7.9	-6.7	1.8	-5.0
	Maize	12.0	3.2	124.7	-8.6	7.6	-1.3	6.1
	Barley	3.3	2.5	106.0	1.9	0.4	-0.3	0.1
KNMI	Wheat	10.4	3.7	130.9	-12.2	-10.4	2.7	-8.0
	Maize	12.0	3.9	124.7	-5.2	5.9	-0.8	5.1
	Barley	3.3	3.2	106.0	20.8	-0.2	-4.4	-4.6
SMHI	Wheat	10.4	1.8	130.9	0.7	-3.3	-0.2	-3.5
	Maize	12.0	1.9	124.7	-1.8	7.7	-0.3	7.4
	Barley	3.3	2.1	106.0	9.2	0.6	-1.8	-1.2

[†] Valeurs moyennes observées sur la période 1961–1990, calculées en utilisant la base de données de Lobell et al. [69].

[‡] ΔT et ΔP sont calculés à partir des données des modèles entre la période de référence 1961–1990 et 2090.

D Secteur de l'énergie

D.1 Stations MétéoSuisse et poids associés

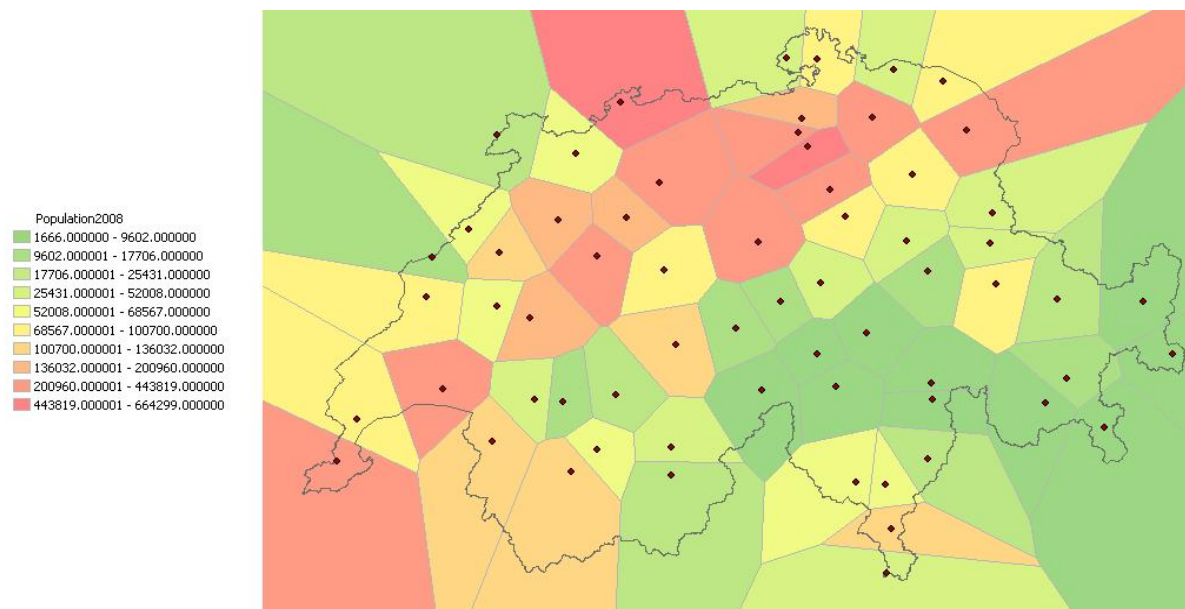


Figure 48 – Part de la population suisse attribuée à 64 stations de MétéoSuisse.

D.2 Calculs des HDD sur la base des scénarios CH2011

Tableau 56 – Calcul des HDD et de leurs variations en 2035 par rapport à la période de référence 1980–2009 sur la base des scénarios CH2011.

		$\theta_{th} = 8^{\circ}\text{C}$	$\theta_{th} = 10^{\circ}\text{C}$	$\theta_{th} = 12^{\circ}\text{C}$
Reference period (1980–2009)	Observed	2836.1	3101.7	3328.3
CH2011 (2035)	A2 lower	2720.2 -4.1%	3006.4 -3.1%	3208.9 -3.6%
	A2 medium	2503.2 -11.7%	2834.2 -8.6%	3023.0 -9.2%
	A2 upper	2303.8 -18.8%	2654.1 -14.4%	2843.5 -14.6%
	A1B lower	2697.1 -4.9%	2983.9 -3.8%	3186.9 -4.2%
	A1B medium	2465.8 -13.1%	2801.7 -9.7%	2990.3 -10.2%
	A1B upper	2253.2 -20.6%	2604.2 -16.0%	2794.3 -16.0%

Tableau 57 – Calcul des HDD et de leurs variations en 2060 par rapport à la période de référence 1980–2009 sur la base des scénarios CH2011.

		$\theta_{th} = 8^{\circ}\text{C}$	$\theta_{th} = 10^{\circ}\text{C}$	$\theta_{th} = 12^{\circ}\text{C}$
Reference period (1980–2009)	Observed	2836.1	3101.7	3328.3
CH2011 (2060)	A2 lower	2440.5 -13.9%	2783.6 -10.3%	2960.4 -11.1%
	A2 medium	2180.0 -23.1%	2528.2 -18.5%	2731.2 -17.9%
	A2 upper	1924.7 -32.1%	2259.7 -27.1%	2518.0 -24.3%
	A1B lower	2430.6 -14.3%	2772.5 -10.6%	2948.9 -11.4%
	A1B medium	2167.9 -23.6%	2514.8 -18.9%	2720.1 -18.3%
	A1B upper	1909.4 -32.7%	2241.7 -27.7%	2505.1 -24.7%

Tableau 58 – Calcul des HDD et de leurs variations en 2085 par rapport à la période de référence 1980–2009 sur la base des scénarios CH2011.

		$\theta_{th} = 8^{\circ}\text{C}$	$\theta_{th} = 10^{\circ}\text{C}$	$\theta_{th} = 12^{\circ}\text{C}$
Reference period (1980–2009)	Observed	2836.1	3101.7	3328.3
CH2011 (2085)	A2 lower	2125.6 -25.1%	2467.3 -20.5%	2680.4 -19.5%
	A2 medium	1797.3 -36.6%	2130.4 -31.3%	2399.2 -27.9%
	A2 upper	1475.9 -48.0%	1808.3 -41.7%	2090.3 -37.2%
	A1B lower	2238.4 -21.1%	2573.4 -17.0%	2768.3 -16.8%
	A1B medium	1937.4 -31.7%	2266.6 -26.9%	2519.3 -24.3%
	A1B upper	1650.1 -41.8%	1981.3 -36.1%	2256.2 -32.2%

D.3 Calculs des CDD sur la base des scénarios CH2011

Tableau 59 – Calcul des CDD et de leurs variations en 2035 par rapport à la période de référence 1980–2009 sur la base des scénarios CH2011.

		$\theta_{bp} = 18.3^{\circ}\text{C}$	$\theta_{bp} = 20^{\circ}\text{C}$	$\theta_{bp} = 22^{\circ}\text{C}$
Reference period (1980–2009)	Observed	45.4	7.2	0.3
CH2011 (2035)	A2 lower	70.6 <i>55.4%</i>	14.3 <i>99.2%</i>	1.2 <i>255.2%</i>
	A2 medium	106.2 <i>133.7%</i>	27.3 <i>280.8%</i>	2.7 <i>674.9%</i>
	A2 upper	147.5 <i>224.7%</i>	49.8 <i>595.2%</i>	6.1 <i>1641.3%</i>
	A1B lower	76.0 <i>67.4%</i>	16.0 <i>123.5%</i>	1.5 <i>322.7%</i>
	A1B medium	115.0 <i>153.1%</i>	31.6 <i>340.7%</i>	3.3 <i>837.9%</i>
	A1B upper	160.4 <i>253.2%</i>	57.9 <i>707.2%</i>	7.8 <i>2129.1%</i>

Tableau 60 – Calcul des CDD et de leurs variations en 2060 par rapport à la période de référence 1980–2009 sur la base des scénarios CH2011.

		$\theta_{bp} = 18.3^{\circ}\text{C}$	$\theta_{bp} = 20^{\circ}\text{C}$	$\theta_{bp} = 22^{\circ}\text{C}$
Reference period (1980–2009)	Observed	45.4	7.2	0.3
CH2011 (2060)	A2 lower	145.7 <i>220.8%</i>	48.9 <i>582.6%</i>	6.2 <i>1681.4%</i>
	A2 medium	206.6 <i>354.8%</i>	89.5 <i>1148.0%</i>	16.1 <i>4519.6%</i>
	A2 upper	278.9 <i>513.9%</i>	141.8 <i>1877.3%</i>	37.0 <i>10520.1%</i>
	A1B lower	148.6 <i>227.0%</i>	50.7 <i>606.7%</i>	6.5 <i>1775.1%</i>
	A1B medium	210.9 <i>364.2%</i>	92.6 <i>1191.2%</i>	17.0 <i>4797.3%</i>
	A1B upper	284.9 <i>527.1%</i>	146.2 <i>1938.6%</i>	39.3 <i>11197.2%</i>

Tableau 61 – Calcul des CDD et de leurs variations en 2085 par rapport à la période de référence 1980–2009 sur la base des scénarios CH2011.

		$\theta_{bp} = 18.3^{\circ}\text{C}$	$\theta_{bp} = 20^{\circ}\text{C}$	$\theta_{bp} = 22^{\circ}\text{C}$
Reference period (1980–2009)	Observed	45.4	7.2	0.3
CH2011 (2085)	A2 lower	254.1 <i>459.3%</i>	125.1 <i>1645.0%</i>	29.0 <i>8238.2%</i>
	A2 medium	378.9 <i>734.1%</i>	217.5 <i>2933.9%</i>	83.6 <i>23939.7%</i>
	A2 upper	527.3 <i>1060.9%</i>	334.6 <i>4566.2%</i>	165.2 <i>47370.5%</i>
	A1B lower	213.9 <i>370.8%</i>	95.1 <i>1226.8%</i>	17.7 <i>4983.2%</i>
	A1B medium	315.0 <i>593.5%</i>	169.4 <i>2262.8%</i>	52.7 <i>15043.9%</i>
	A1B upper	434.7 <i>856.8%</i>	259.8 <i>3522.7%</i>	112.3 <i>32166.5%</i>

E Secteur du tourisme

E.1 Le marché mondial du ski

Tableau 62 – Le marché du ski dans 25 pays. (Source: adapté de [101])

	Nombre de journées-skieurs (JS) ¹	Proportion de skieurs étrangers	Nombre de remontées mécaniques (RM)	JS/RM	Nombre de stations >4 RM	Nombre de stations majeures (>1 mio JS)	
Allemagne	13 380 000	10.0%	1 787	7 487	510	82	0
Andorre	2 290 000	95.0%	111	20 631	3	3	1
Australie	1 958 000	1.5%	147	13 320	10	7	0
Autriche	51 512 000	66.0%	3 313	15 548	254	199	12
Bulgarie	600 000	20.0%	94	6 383	19	7	0
Canada	18 975 600	13.8%	888	21 369	288	73	1
Chine	5 000 000	5.0%	773	6 468	200	7	0
Corée du Sud	6 067 832	10.0%	130	46 676	18	16	0
Espagne	6 373 200	10.0%	356	17 902	34	30	1
Finlande	2 700 000	8.0%	387	6 977	76	30	0
France	54 320 000	28.0%	3 790	14 332	325	233	14
Hongrie	500 000	10.0%	64	7 813	29	5	0
Italie	26 860 000	15.0%	2 006	13 390	349	216	4
Japon	40 683 864	3.0%	2 422	16 798	547	280	0
Norvège	5 860 000	8.0%	667	8 786	213	40	0
Nouvelle Zélande	1 353 800	32.0%	93	14 557	25	10	0
Pologne	2 000 000	5.0%	832	2 404	72	11	0
République Tchèque	3 000 000	10.0%	816	3 676	176	70	0
Roumanie	1 200 000	5.0%	141	8 511	28	5	0
Slovaquie	3 900 000	10.0%	489	7 975	91	47	0
Slovénie	1 520 000	15.0%	217	7 005	41	24	0
Suède	8 020 000	8.0%	834	9 616	233	69	1
Suisse	27 720 000	50.0%	2 284	12 137	240	115	7
Ukraine	800 000	5.0%	98	8 163	41	8	0
USA	57 637 600	5.6%	3 122	18 462	481	354	7

¹ Il s'agit soit d'une valeur moyenne sur la période allant de 2005 à 2009 soit d'une estimation.

E.2 Dépenses journalières moyennes des visiteurs

Tableau 63 – Structure des dépenses (hors voyage aller-retour) des visiteurs du canton du Valais, de l’Oberland bernois et des Alpes vaudoises durant la saison d’hiver. (Source: [85, 86, 87])

	Valais ¹		Oberland bernois ²		Alpes vaudoises ³	
	Ensemble des visiteurs	Excursionnistes	Touristes	Excursionnistes	Touristes	
Hébergement	33 (31.4%)	0 (0%)	41.1 (38.3%)	0 (0%)	32.0 (32.0%)	
Restauration	25 (23.8%)	23.7 (45.2%)	28.0 (26.1%)	22.4 (41.0%)	20.3 (20.3%)	
Commerce de détail	18 (17.1%)	4.1 (7.8%)	19.1 (17.8%)	12.3 (22.5%)	15.6 (15.5%)	
Remontées méc.	16 (15.2%)	22.0 (41.9%)	11.3 (10.5%)	16.0 (29.2%)	9.7 (9.7%)	
Autres ⁴	13 (12.4%)	2.6 (5.0%)	7.9 (7.3%)	4.0 (7.3%)	22.5 ⁵ (22.5%)	
Total	105 (100%)	52.4 (100%)	107.3 (100%)	54.6 (100%)	100.0 (100%)	
Tous les montants représentent des dépenses nominales en CHF par jour et par personne						

¹ Valeurs déterminées lors de la saison d’hiver 1999/2000.

² Valeurs déterminées lors de la saison d’hiver 1993/1994.

³ Valeurs déterminées lors de la saison d’hiver 2002/2003.

⁴ Inclus notamment les dépenses pour les postes suivants: déplacements durant le séjour, cours de sport, formations, entrées, santé (sans médecins/hôpitals), articles de location.

⁵ Cette valeur très haute s’explique par la présence de nombreuses écoles privées dans les Alpes vaudoises et donc par des frais de scolarité élevés (les étudiants et écoliers étrangers sont considérés ici comme des touristes).