



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ DE MOSTAGANEM ABDELHAMID IBN BADIS
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT D'ARCHITECTURE



THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du

DIPLÔME DE DOCTORAT LMD

Spécialité : Architecture
Option : Patrimoine et projet urbain

Par

ILES Sidi Mohammed

Adaptation des bâtiments aux changements climatiques en Algérie. Cas des bâtiments éducatifs

Soutenue publiquement devant le jury composé de :

MEBROUKI Abdelkader	Professeur	Président	Université de Mostaganem
OUISSI Nabil	Professeur	Examineur	Université de Tlemcen
MALIKI Mustapha	Professeur	Examineur	Université de Mostaganem
DJERADI Mustapha	Maître de conférences	Examineur	Université de Mostaganem
KADI Sid El Mahi Lamine	Professeur	Rapporteur	Université de Mostaganem
SEDDIKI Mohammed	Maître de conférences	Co-rapporteur	Université de Mostaganem

Année Universitaire : 2023-2024

Remerciements

Je remercie ALLAH, le Tout Puissant, qui m'a donné la force, le courage et la volonté pour mener cette thèse à son terme.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur KADI Lamine, directeur de thèse, ainsi qu'à Monsieur SEDDIKI Mohammed, co-directeur de thèse, qui ont guidé ma réflexion tout au long de ces années de recherche. Je leur suis profondément reconnaissant pour la confiance qu'ils m'ont accordée et le temps précieux qu'ils m'ont consacré. Leur participation active, leurs retours constructifs et leurs suggestions pertinentes ont contribué de manière significative à l'aboutissement de ce travail de recherche. Je tiens à leur exprimer mes sincères remerciements et l'assurance de mon plus haut estime.

Je remercie chaleureusement M. MEBROUKI Abdelkader pour avoir aimablement accepté de présider mon jury de soutenance. Je tiens aussi à remercier vivement M. OUISSI Nabil, M. MALIKI Mustapha, et M. DJERADI Mustapha d'avoir accepté d'examiner cette thèse.

Ce travail de thèse a été réalisé au sein de l'université des sciences et de la technologie de Mostaganem. Je tiens à remercier M. CHACHOUR Madjid, M. BENDOUKHA Mohammed, M. SARDOU Miloud, M. ROUBAI CHORFI Nabil, ainsi que tout le personnel de l'université de Mostaganem pour leur soutien qu'ils m'ont apporté tout au long de ce travail.

Je souhaite exprimer ma gratitude envers Monsieur OUISSI pour son soutien et son expertise dans l'accomplissement de ce travail.

Je suis sincèrement reconnaissant à M. ZEROUALA Mohamed Salah, M. TABET-AOUL Mahi, Mme. BENSAFI Khadidja, M. AISSANI Omar, RABAH Mohammed, GHEZLAOUI Ahmed pour leurs précieuses aides.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance envers les institutions et les organismes qui ont apporté une contribution significative à la réalisation de cette étude, en particulier, la Direction de l'Éducation et la Direction des Équipements Publics de la Wilaya de Tlemcen qui ont mis à notre disposition les documents et ressources nécessaires pour mener à bien cette recherche.

Je tiens aussi à remercier toute ma famille, mes amis ainsi que mes collègues de la post-graduation pour leurs encouragements constants et leur présence bienveillante.

Je tiens à exprimer mes remerciements à LAZAR Abd Nacer, ex-responsable des archives dans la commune de Tlemcen pour ses encouragements tout au long de ce parcours.

À la mémoire de mon père...

Résumé

L'augmentation, depuis la révolution industrielle, des émissions de gaz à effet de serre causées par les activités humaines, notamment par la consommation toujours croissante des hydrocarbures, demeure la principale cause du changement climatique observé. Ce dernier se traduit principalement par une augmentation alarmante de la température moyenne de la terre, le réchauffement global, ainsi que par l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des phénomènes météorologiques extrêmes.

Selon les projections du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), une hausse marquée des températures est prévue d'ici la fin du XXI^e siècle, accompagnée d'épisodes de canicule plus fréquentes et plus intenses. Cette hausse globale des températures a engendré déjà un impact significatif sur la consommation énergétique des bâtiments et contribué substantiellement à la détérioration du niveau de confort thermique de leurs usagers. Dans ce contexte, il est ainsi devenu impératif de concilier conception des bâtiments neufs et enjeux climatiques, mais également et prioritairement d'adapter les bâtiments existants à ces nouveaux enjeux. Il s'agit donc de concevoir et de mettre en œuvre des stratégies et des solutions d'adaptation des bâtiments au changement climatique présent et futur. L'adaptation des bâtiments permettrait à la fois d'améliorer le confort thermique de leurs usagers tout en réduisant leur consommation énergétique, en sus de tous les avantages économiques et environnementaux qui en découlent, particulièrement pour les bâtiments tertiaires.

L'objectif principal de la présente thèse est d'évaluer l'impact du réchauffement global sur les consommations énergétiques et le confort thermique d'un bâtiment éducatif existant et d'analyser l'efficacité de diverses mesures d'adaptation se résumant principalement à sa rénovation thermique et énergétique. Dans ce cadre, nous avons eu recours à la modélisation et à la simulation dynamique du comportement thermique et des performances énergétiques du bâtiment étudié à l'aide du logiciel de simulation dynamique « DesignBuilder-EnergyPlus » à différents horizons climatiques et en appliquant les critères du standard de rénovation énergétique « EnerPHit » comme cadre de référence. Auparavant, le modèle de simulation a été calibré suite à la conception et à la mise en œuvre d'un dispositif expérimental de mesure et d'acquisition des données de températures à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment étudié.

Les résultats obtenus mettent en évidence la nécessité de l'adaptation des bâtiments face au changement climatique attendu et permettent d'analyser l'efficacité des mesures proposées tout en fournissant des recommandations pratiques pour la conception et la rénovation énergétiques des bâtiments éducatifs.

Mots-clés : Changement climatique ; Bâtiments éducatifs ; Modélisation ; Simulation dynamique ; Logiciel « DesignBuilder-EnergyPlus » ; Performances énergétiques ; Mesures d'adaptation ; Rénovation énergétique ; Standard « EnerPHit ».

Abstract

The increase in greenhouse gas emissions resulting from human activities, particularly the ever-growing consumption of hydrocarbons since the industrial revolution, remains the primary cause of observed climate change. This is primarily manifested by a concerning rise in the average Earth temperature, global warming, as well as an increase in the frequency and intensity of extreme meteorological events.

According to projections by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), a marked increase in temperatures is anticipated by the end of the 21st century, accompanied by more frequent and more intense heatwaves. This overall temperature rise has already had a significant impact on the energy consumption of buildings and substantially contributes to the degradation of the thermal comfort levels of their occupants.

In this context, it has become imperative to reconcile the design of new buildings with climate-related challenges, and, more importantly, to adapt existing buildings to these new challenges. Therefore, it is necessary to develop and implement strategies and solutions for building adaptation to current and future climate change. Adapting buildings would not only improve the thermal comfort of their occupants but also reduce their energy consumption, in addition to the numerous economic and environmental benefits that ensue, particularly for tertiary buildings.

The primary objective of this thesis is to assess the impact of global warming on the energy consumption and thermal comfort of an existing educational building and to analyze the effectiveness of various adaptation measures, primarily focused on its thermal and energy retrofit. In this context, we employed modeling and dynamic simulation of the thermal behavior and energy performance of the studied building using the « DesignBuilder-EnergyPlus » dynamic simulation software under different climatic scenarios, while adhering to the criteria of the «EnerPHit» energy standard as a reference framework. Previously, the simulation model was calibrated through the design and implementation of an experimental system for temperature data measurement and acquisition both inside and outside the studied building.

The results obtained underscore the necessity of building adaptation in the face of expected climate change and provide an analysis of the efficiency of the proposed measures, along with practical recommendations for the energy-efficient design and renovation of educational buildings.

Keywords: Climate Change; Educational Buildings; Modeling; Dynamic simulation; «DesignBuilder-EnergyPlus» software; Energy Performance; Adaptation Measures; Energy retrofitting; « EnerPHit » Standard.

ملخص

زيادة انبعاثات غازات الاحتباس الحراري التي تسببها الأنشطة البشرية، وخاصة بسبب زيادة إستهلاك الهيدروكربونات بشكل مستمر، منذ الثورة الصناعية، لا تزال السبب الرئيسي للتغيرات المناخية التي نشهدها. يظهر هذا بشكل رئيسي من خلال زيادة مقلقة في درجة حرارة الأرض والاحتباس الحراري، بالإضافة إلى زيادة تردد وشدة الظواهر الجوية القسوى. من المتوقع زيادة ملموسة في درجات الحرارة بحلول نهاية القرن الواحد والعشرون، مع حدوث موجات حر أكثر تواترًا وشدةً. هذا الارتفاع العام في درجات الحرارة قد أثر بالفعل بشكل كبير على استهلاك الطاقة في المباني وساهم بشكل كبير في تدهور مستوى الراحة الحرارية للمستخدمين.

في هذا السياق، أصبح أمرًا ضروريًا الجمع بين تصميم المباني الجديدة وقضايا المناخ. ولكن الأكثر أهمية هو تكييف المباني القائمة مع هذه التحديات الجديدة. وبالتالي، يجب تطوير استراتيجيات وحلول لتكييف المباني مع التغيرات المناخية الحالية والمستقبلية. تكييف المباني سيساهم في تحسين الراحة الحرارية لمستخدميها وفي الوقت نفسه في تقليل إستهلاك الطاقة، بالإضافة إلى الفوائد الإقتصادية والبيئية العديدة التي تنتج عن ذلك، وخاصة بالنسبة للمباني الخدمية.

لهدف الرئيسي من هذه الأطروحة هو تقييم تأثير الاحتباس الحراري على استهلاك الطاقة والراحة الحرارية لمبنى تعليمي قائم، وتحليل فعالية تدابير التكيف المختلفة التي تتمثل أساسًا في تجديده حراريًا وطاقيًا. في هذا الإطار، قمنا باستخدام النمذجة والمحاكاة الديناميكية للسلوك الحراري والأداءات الطاقية للمبنى المدروس باستخدام برنامج المحاكاة الديناميكي-DesignBuilder "EnergyPlus" في أفاق مناخية مختلفة، مع تطبيق معايير معيار تجديد الطاقة "EnerPHit" كإطار مرجعي. قبل ذلك، تم معايرة نموذج المحاكاة من خلال تصميم وإستعمال جهاز تجريبي لقياس وجمع بيانات درجات الحرارة داخل وخارج المبنى المدروس.

تُظهر النتائج التي تم الحصول عليها الحاجة إلى تكييف المباني مع تغير المناخ المتوقع، وتسمح بتحليل فعالية التدابير المقترحة، مع توفير توصيات عملية لتصميم وتجديد المباني التعليمية من الناحية الطاقية.

الكلمات المفتاحية: التغير المناخي، المباني التعليمية، النمذجة، المحاكاة الديناميكية، برنامج «DesignBuider-EnergyPlus»، الأداء الطاقوي، إجراءات التكيف، التجديد الطاقوي، المعيار «EnerPHit» .

Table des matières

Remerciements	2
Résumé	4
Abstract	5
ملخص.....	6
Liste des tableaux	12
Liste des figures	14
Liste des acronymes & abréviations.....	20
Liste des symboles & unités.....	23
Introduction générale.....	25
Contexte général.....	26
Problématique de recherche	28
Hypothèse de travail.....	30
Objectif de la recherche.....	30
Méthodologie de la recherche	30
Structure de la thèse	31
Chapitre I Le changement climatique	32
1.1 Introduction	33
1.2 Climat et météorologie	33
1.3 Le système climatique et ses composantes.....	34
1.3.1 L'atmosphère.....	34
1.3.2 Les océans	37
1.4 Le changement climatique.....	38
1.4.1 Changement climatique naturel.....	38
1.4.1.1 La variabilité naturelle du climat.....	38
1.4.1.2 L'effet de serre	40
1.4.1.3 Le forçage radiatif	41
1.4.2 Changement climatique anthropique.....	41
1.4.2.1 Indicateurs du changement climatique	43
1.4.2.2 Les impacts du changement climatique.....	46
1.4.2.3 Historique des négociations internationales sur le climat.....	48
1.4.2.4 La relation entre réchauffement climatique et changement climatique.....	50
1.4.3 Le changement climatique observé	51

1.4.3.1	Le changement climatique observé à l'échelle globale	51
1.4.3.2	Le changement climatique observé dans la région méditerranéenne	53
1.4.3.3	Le changement climatique observé en Algérie.....	56
1.4.4	Approches de lutte contre le changement climatique.....	61
1.4.4.1	Atténuation et adaptation.....	61
1.4.4.2	Les co-bénéfices de l'atténuation et de l'adaptation	63
1.5	La modélisation climatique	64
1.5.1	Évolution des modèles climatiques	68
1.5.2	La descente d'échelle	72
1.5.2.1	Descente d'échelle dynamique	74
1.5.2.2	Descente d'échelle statistique.....	74
1.6	Les scénarios climatiques	77
1.6.1	Les scénarios « SRES » (Special Reports on Emission).....	77
1.6.2	Les scénarios « RCP » (<i>Representative Concentration Pathways</i>).....	79
1.6.3	Les scénarios « SSP » (<i>Shared Socioeconomic Pathway</i>)	80
1.6.4	Le Changement climatique projeté.....	81
1.6.4.1	Le changement climatique projeté à l'échelle globale suivant les scénarios RCP	81
1.6.4.2	Le changement climatique projeté dans la région méditerranéenne.....	83
1.6.4.3	Le changement climatique projeté en Algérie.....	85
	Conclusion.....	88
2	Chapitre II Changement climatique et bâtiment.....	89
2.1	Typologie des impacts du changement climatique sur les bâtiments.....	90
2.2	La rénovation énergétique, principale approche d'adaptation des bâtiments existants au changement climatique.....	92
2.2.1	Synthèse bibliographique	92
2.2.2	Les co-bénéfices de la rénovation thermique et énergétique des bâtiments.....	96
2.2.3	Le confort thermique	96
2.2.3.1	Les facteurs influant sur le confort thermique.....	97
2.2.3.2	Relation entre climat et confort thermique	100
2.3	Typologie des mesures de rénovation thermique et énergétique des bâtiments existants	101
2.3.1	Isolation thermique.....	102
2.3.2	Performances thermiques des fenêtres	105
2.3.3	Étanchéité à l'air de l'enveloppe extérieure	106
2.3.4	Ventilation naturelle	109

2.3.5	Ventilation mécanique.....	112
2.3.5.1	Systèmes de ventilation par extraction	112
2.3.5.2	Systèmes de ventilation par insufflation.....	112
2.3.5.3	Système de ventilation équilibré	114
2.3.5.4	Systèmes de ventilation à récupération d'énergie.....	114
2.3.6	Combinaison entre ventilation naturelle et climatisation : Mode mixte	115
2.3.7	Dispositif d'ombrage	118
2.4	Standards et labels pour les performances énergétiques des bâtiments	120
2.4.1	Le label « Minergie » (Minergie, 2023)	120
2.4.2	Le label « HQE » (Alliance HQE-GBC, 2023).....	121
2.4.3	Le label « BBC Effinergie Rénovation » (Effinergie, 2021)	121
2.4.4	Le standard « Passivhaus » (Passive House Institute, 2023).....	121
2.4.5	Le standard « EnerPHit » (Passive House Institute, 2023)	122
	Conclusion.....	125
3	Chapitre III Modélisation et simulation du comportement thermique et des performances énergétiques d'un bâtiment éducatif	126
3.1	Les bâtiments éducatifs et le changement climatique	127
3.1.1	Vulnérabilité et adaptation des bâtiments éducatifs au changement climatique	127
3.1.2	Les bâtiments éducatifs en Algérie	128
3.2	Le cas d'étude.....	129
3.2.1	Description du bâtiment étudié.....	129
3.2.2	Description des éléments constructifs du bâtiment étudié	131
3.2.3	Caractérisation du climat de la localité de Tlemcen-Zenata	133
3.3	La simulation du comportement thermique et des performances énergétiques du bâtiment étudié	134
3.3.1	Le logiciel de modélisation et de simulation « DesignBuilder -EnergyPlus ».....	134
3.3.2	Le cas de base et les variantes de simulation	136
3.3.2.1	Le cas de base.....	137
3.3.2.2	Simulation des mesures d'adaptation : les variantes de simulation physiques.....	137
3.3.2.3	Les variantes de simulation climatiques.....	139
3.4	Les données météorologiques pour la simulation	140
3.4.1	Génération des fichiers météorologiques EPW pour la simulation.....	140
3.4.2	Analyse des données climatiques générées	141
3.5	Calibration du modèle de simulation thermique et énergétique du bâtiment.....	144

3.5.1	Le processus de calibration du modèle de simulation	144
3.5.2	Les résultats du processus de calibration	146
	Conclusion	150
4	Chapitre IV Analyse des résultats de simulation	151
4.1	Impact du changement climatique futur sur la demande énergétique du bâtiment existant (sans mesures d'adaptation)	152
4.1.1	Impact sur la demande énergétique de chauffage	153
4.1.2	Impact sur la demande énergétique de refroidissement	153
4.2	Évaluation de l'impact des mesures d'adaptation séparées	154
4.2.1	Impact des mesures d'adaptation séparées sur la demande énergétique de chauffage	154
4.2.1.1	Isolation thermique par l'extérieur (ITE)	156
4.2.1.2	Utilisation de fenêtres performantes (UFP).....	156
4.2.1.3	Amélioration de l'étanchéité à l'air (AEA).....	156
4.2.1.4	Introduction d'une ventilation naturelle nocturne (VNN).....	156
4.2.1.5	Installation de surplombs d'ombrage (OMB).....	156
4.2.1.6	Utilisation d'un mode hybride de conditionnement d'air (MHC)	156
4.2.2	Impact des mesures d'adaptation séparées (MAS) sur la demande énergétique de refroidissement	157
4.2.2.1	Isolation thermique par l'extérieur (ITE)	158
4.2.2.2	Utilisation de fenêtres performantes (UFP).....	158
4.2.2.3	Amélioration de l'étanchéité à l'air (AEA).....	159
4.2.2.4	Introduction d'une ventilation naturelle nocturne (VNN).....	159
4.2.2.5	Installation de surplombs d'ombrage (OMB).....	159
4.2.2.6	Utilisation d'un mode hybride de conditionnement d'air (MHC)	159
4.2.3	Efficacité des mesures d'adaptation séparées (MAS) rapportée au standard EnerPHit	159
4.3	Évaluation de l'impact des mesures d'adaptation cumulées.....	161
4.3.1	Impact des mesures d'adaptation cumulées sur la demande énergétique de chauffage	161
4.3.2	Impact des mesures d'adaptation cumulées sur la demande énergétique de refroidissement	163
4.3.3	Efficacité des mesures d'adaptation cumulées (MAC) rapportée au standard EnerPHit	165
4.4	Discussion des résultats	167
	Conclusion générale	172

Références bibliographiques	176
Annexes	193
Annexe I Les degrés-jours de chauffage et de refroidissement.....	194
Annexe II Processus de génération des fichiers EPW à l'aide du logiciel Meteonorm	197
Annexe III Le protocole de la campagne de mesures in-situ	202
Annexe IV Développement du dispositif de mesure des températures	209

Liste des tableaux

Tableau 1: Les principaux gaz à effet de serre et leur PRG (Kershaw, 2017).....	41
Tableau 2: Codification de la classification de Köppen-Geiger (Beck et al., 2018).....	59
Tableau 3: Différences entre atténuation et adaptation au changement climatique (Locatelli, 2011).....	63
Tableau 4: Exemples de co-bénéfices d'actions d'adaptation et d'atténuation	64
Tableau 5 : Liste et pays d'origine de quelques modèles climatiques globaux (IPCC, 2013)	67
Tableau 6: Description des scénarios SRES (adapté par l'auteur à partir de Goosse et al., 2010; IPCC, 2000; Verichev et al., 2020)	78
Tableau 7: Description des scénarios RCP (IPCC, 2014 ; van Vuuren et al., 2011)	79
Tableau 8: Les co-bénéfices de la rénovation thermique et énergétique des bâtiments	96
Tableau 9: L'effet de l'activité sur les niveaux de métabolisme (Fabbri, 2015).....	98
Tableau 10: Résistance thermique d'une lame d'air ($m^2.K/W$) (CNERIB, 2016).....	104
Tableau 11: Critères EnerPHit pour la méthode des composantes du bâtiment (Passive House Institute, 2023).	122
Tableau 12: Critères EnerPHit pour la méthode de la demande énergétique (Passive House Institute, 2023)	123
Tableau 13: Description du bâtiment étudié.	130
Tableau 14: Caractéristiques physiques et thermiques des éléments constructifs du bâtiment étudié.	132
Tableau 15: Principales données climatiques de la localité de Tlemcen-Zenata pour la période « contemporaine » (Meteonorm, 2020).....	133
Tableau 16: Données principales d'entrée et de sortie du logiciel « DesignBuilder-EnergyPlus » (DesignBuilder-EnergyPlus, 2019).....	135
Tableau 17: Matrice des cas de simulation	136
Tableau 18: Valeurs des taux de ventilation naturelle et d'infiltration d'air (étanchéité à l'air) utilisées dans la simulation du cas de base.....	137
Tableau 19: Description des mesures d'adaptation considérées dans cette étude.....	138
Tableau 20: Critères de calibration de l'ASHRAE (ASHRAE, 2002)	146

Tableau 21: Résultats de calibration du modèle de simulation thermique du bâtiment avec un taux d'infiltration d'air de 1,5 ACH comparés aux critères de l'ASHRAE (ASHRAE, 2002).	146
Tableau 22: Résultats de calibration du modèle de simulation thermique du bâtiment avec un taux de renouvellement d'air de 2,0 ACH comparés aux critères de l'ASHRAE (ASHRAE, 2002).	147
Tableau 23: Résultats de calibration du modèle de simulation thermique du bâtiment avec un taux de renouvellement d'air de 2,5 ACH comparés aux critères de l'ASHRAE (ASHRAE, 2002).	147
Tableau 24: Taux de variation de la demande énergétique de chauffage et de refroidissement du bâtiment existant (sans mesures d'adaptation) entre le climat « actuel » et les climats « futurs » 2050 et 2080 pour les deux scénarios d'émission RCP4.5 et RCP8.5.....	153
Tableau 25: Impact des mesures d'adaptation séparées (MAS) sur la demande énergétique de chauffage du bâtiment étudié pour les climats « actuel » et « futurs »	154
Tableau 26: Impact des mesures d'adaptation séparées (MAS) sur la variation de la demande énergétique de chauffage par rapport au cas de base pour les climats actuel et futurs	155
Tableau 27: Impact des mesures d'adaptation séparées (MAS) sur la demande énergétique de refroidissement du bâtiment étudié pour les climats « actuel » et « futurs »	157
Tableau 28: Impact des mesures d'adaptation séparées (MAS) sur la variation de la demande énergétique de refroidissement par rapport au cas de base pour les climats actuel et futurs .	158
Tableau 29: Impact des mesures d'adaptation cumulées (MAC) sur la demande énergétique de chauffage du bâtiment étudié pour les climats « actuel » et « futurs »	161
Tableau 30: Impact des mesures d'adaptation séparées (MAC) sur la variation de la demande énergétique de chauffage par rapport au cas de base pour les climats actuel et futurs	161
Tableau 31: Impact des mesures d'adaptation cumulées (MAC) sur la demande énergétique de refroidissement du bâtiment étudié pour les climats « actuel » et « futurs »	163
Tableau 32: Impact des mesures d'adaptation cumulées (MAC) sur la variation de la demande énergétique de refroidissement par rapport au cas de base pour les climats actuel et futurs .	163
Tableau 33: Caractéristiques des salles de classe sélectionnées pour la calibration du modèle.	201

Liste des figures

Figure 1: Structure de la consommation finale d'énergie par secteur d'activité (MEM, 2022)	26
Figure 2: Répartition des émissions de CO ₂ dues à l'utilisation de l'énergie (MATE, 2010) 28	
Figure 3: Représentation des composantes du système climatique et de leurs principales interactions (Treut et al., 2007).	34
Figure 4: Image satellite de la formation de nuages condensés dans la région ZITC (NCAR, 2023).	35
Figure 5: Coupe schématique des cellules atmosphériques (Arbogast, 2014)	36
Figure 6: Représentation de la circulation atmosphérique de la Terre (Mathez and Smerdon 2018).	36
Figure 7: Représentation de la circulation thermohaline à travers la planète (Mathez & Smerdon, 2018)	37
Figure 8: Les mouvements orbitaux de la Terre : précession, déclinaison et excentricité (Mathez & Smerdon, 2018).	39
Figure 9: Effet de serre et bilan radiatif de la Terre (W/m ²) (Hartmann, 2016).	40
Figure 10: Augmentation des émissions anthropiques des gaz à effet de serre et accentuation de l'effet de serre naturel (Shafer, 2017).	42
Figure 11: Évolution de la température et des concentrations du CO ₂ et du méthane au cours des 650 000 dernières années (Mathez & Smerdon, 2018).	42
Figure 12: Comparaison des températures simulée, mesurée et reconstituée par rapport à celle de 1850-1900.	43
Figure 13: Anomalies de la température à la surface du globe, par rapport à la moyenne de 1951-1980, depuis 1880 (NASA, 2024).	43
Figure 14: Étendue de la glace de l'océan arctique en hiver et en été (1979–2019) (Wolff et al., 2020).	44
Figure 15: Couverture neigeuse de l'hémisphère nord en juin (1979–2019) (Wolff et al., 2020)	45
Figure 16: Contenu thermique de l'océan supérieur (1979–2019) (Wolff et al., 2020)	45
Figure 17: Niveau global des mers (1955-2019) (Wolff et al., 2020)	45
Figure 18: Interactions et impacts climatiques (Shafer, 2017).	46
Figure 19: La diminution de la superficie de la couverture de glace de l'océan Arctique entre 1979-2015 (Mathez & Smerdon, 2018)	47

Figure 20: Événements politiques internationaux de lutte contre le changement climatique (Eaufrance, 2019).....	50
Figure 21: Les CdP et les principales actions qui en résultent (Eaufrance, 2019).....	50
Figure 22: Changements observés dans la température moyenne de l'air à la surface du globe (a) et dans la répartition géographique de la température (b) (Mathez & Smerdon, 2018)	52
Figure 23: Le changement observé de la teneur en chaleur de l'océan mondial (Mathez & Smerdon, 2018).....	53
Figure 24: Réchauffement observé au niveau global (en vert) et dans le bassin méditerranéen (en bleu) (UNEP/MAP & Plan Bleu, 2020).....	54
Figure 25: Réchauffement (°C/décennie) observé en Méditerranée au cours des périodes 1950-2018 (A) et 1980-2018 (B) (MedECC, 2020).....	55
Figure 26: Changements observés des précipitations dans le bassin méditerranéen 1950-2018 (C) et 1980-2018 (D) (mm/jour/décennie) (MedECC, 2020)	56
Figure 27: Étages bioclimatiques de l'Algérie (MATE, 2010).....	57
Figure 28: Climats de l'Algérie selon la classification de Köppen-Geiger (Beck et al., 2018)	58
Figure 29: Évolution de la température moyenne annuelle à Oran (1926- 2006) (Tabet-Aoul, 2008).....	60
Figure 30: Carte pluviométrique selon l'ANRH pour les périodes 1922-1989 (A) et 1965-2004 (B) (Elmeddahi, 2016).....	61
Figure 31: Stratégies de réponse au changement climatique (Locatelli, 2011).....	62
Figure 32: Relation entre l'adaptation et l'atténuation du changement climatique (Salagnac, 2015).....	62
Figure 33: Représentation schématique de la structure de la grille cartésienne utilisée dans les MCG à différences finies (Edwards, 2011).....	65
Figure 34: Comparaison entre les données observées et les résultats de modèles à différentes résolutions (Mathez & Smerdon, 2018)	66
Figure 35: Le superordinateur Frontier (Flickr, 2022).....	66
Figure 36: Processus d'évolution des modèles climatiques (Solomon et al., 2007)	70
Figure 37: Évolution de la résolution des modèles climatiques globaux dans les différents rapports du GIEC (Solomon et al., 2007).....	71
Figure 38: Évolution de la résolution des modèles climatiques globaux dans les différents rapports du GIEC (IPCC, 2013).....	72
Figure 39: Le concept de descente d'échelle (Trzaska & Schnarr, 2014).....	73
Figure 40: Schéma du processus de production des fichiers climatiques futurs par l'approche « descente d'échelle » (Adapté par l'auteur à partir de Berardi & Jafarpur, 2020)	74

Figure 41: Évolution du réchauffement global selon les scénarios SRES (Solomon et al., 2007)	77
Figure 42: Forçage radiatif total des différents scénarios RCP (IPCC, 2013)	79
Figure 43: Changement de température en surface projeté pour la période 2081-2100 par rapport à la période 1986-2005 (IPCC, 2013).....	81
Figure 44: Évolution de la température moyenne de surface selon les scénarios RCPs (IPCC, 2013).....	81
Figure 45: Changement de précipitations en surface projeté pour la période 2081-2100 par rapport à la période 1986-2005 (IPCC, 2013).....	82
Figure 46: Classification climatique Köppen-Geiger du climat actuel (1980–2016) et pour les projections futures (2071-2100) (Beck et al., 2018).	83
Figure 47: Changement projeté de la température annuelle dans le Bassin méditerranéen par rapport à la période de référence récente (1980-1999). A : simulations pour les scénarios RCP2.6 et RCP8.5. B : réchauffement à la fin du 21e siècle (2080-2099) pour le scénario RCP2.6. C : idem pour le scénario RCP8.5 (MedECC, 2020).....	84
Figure 48: Changement projeté des précipitations annuelles dans le Bassin méditerranéen par rapport à la période de référence récente (1980-1999). A : simulations pour les scénarios RCP2.6 et RCP8.5. B : anomalies des précipitations à la fin du 21e siècle (2080-2099) pour le scénario RCP2.6. C : idem pour le scénario RCP8.5 (MedECC, 2020)	84
Figure 49: Anomalies de température de surface de la mer Méditerranée pour la période 2070-2099 (par rapport à 1961-1990). Maximales (en haut) et minimales (en bas) (UNEP/MAP & Plan Bleu, 2020).....	85
Figure 50: Températures moyennes interannuelles en Algérie sur les périodes 2006-2060 (A) et 2045-2100 (B) pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 (Zeroual et al., 2020).....	86
Figure 51: Précipitations moyennes interannuelles en Algérie sur les périodes 2006-2060 (A) et 2045-2100 (B) pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 (Zeroual et al., 2018).....	87
Figure 52: Représentation de la relation complexe entre le changement climatique, les bâtiments, les occupants et les process (adaptée de: de Wilde & Coley, 2012).....	91
Figure 53: Les facteurs influant sur le confort thermique (Liébard & De Herde, 2005)	97
Figure 54: L'impact de la température de l'air et des parois sur la température de confort (Liébard & De Herde, 2005)	99
Figure 55: Diagramme de représentation de la zone de confort hygrothermique (Home Expert, 2022).....	100
Figure 56: Évolution libre de la température intérieure dans deux bâtiments de niveaux d'adaptation au climat différents (Roulet, 2004)	101
Figure 57: Déperditions thermiques à travers l'enveloppe du bâtiment (ADEME , 2008)...	102

Figure 58: Variations des températures quotidiennes d'un logement en fonction de son inertie thermique (Energie Plus Le Site, 2007a)	103
Figure 59: Résistance thermique totale d'une paroi (Energie Plus Le Site, 2007b)	104
Figure 60: Propriétés thermiques des fenêtres (fenetre24.be, 2023).....	105
Figure 61: Caractéristiques optiques et thermiques d'un double vitrage rempli de gaz argon (adapté de Kibert, 2016).....	106
Figure 62: Membrane d'étanchéité (Projet Vert, 2021)	108
Figure 63: Une Arrivée traversant la membrane d'étanchéité pour le passage des réseaux (Projet Vert, 2021).....	108
Figure 64: Étanchéité de menuiserie extérieure (Projet Vert, 2021).....	108
Figure 65: La circulation du vent autour d'un bâtiment (Hui., 2016).....	109
Figure 66: Ventilation par différence de température (Hui., 2016).....	110
Figure 67: Effet du tirage thermique dans les bâtiments (Khatami, 2014)	111
Figure 68: Effet combiné du vent de la différence de pression (Hui., 2016)	111
Figure 69: Ventilation par extraction d'air (Energy saver, n.d.)	112
Figure 70: Ventilation par insufflation d'air (Energy saver, n.d.)	113
Figure 71: Ventilation équilibrée (Energy saver, n.d.).....	114
Figure 72: Système de ventilation par récupération de chaleur (Central Virginia Radon, 2021)	115
Figure 73: Schématisation de la ventilation en mode mixte Concurrent (CBE, 2013)	116
Figure 74: Schématisation de la ventilation en mode mixte change-over (CBE, 2013)	117
Figure 75: Schématisation de la ventilation en mode mixte zoné (CBE, 2013)	117
Figure 76: Typologie de base des dispositifs de protection solaire horizontaux pour les expositions au Sud (Curator: Hall of Art & Architecture, 2015).....	118
Figure 77: Dispositifs d'ombrage pour les expositions non méridionales (Curator: Hall of Art & Architecture, 2015)	119
Figure 78: Géométrie du porte-à-faux de la fenêtre (Rogue valley door, n.d.).....	119
Figure 79: Vue satellitaire du cas d'étude (Google Earth, 2023).....	129
Figure 80: Situation géographique du cas d'étude (34°59'04" N, 1°27'30" W) (Google Earth, 2023).....	129
Figure 81: Schématisation des différents blocs du bâtiment étudié.	130
Figure 82: Évolution, pour la localité du cas d'étude (Tlemcen-Zenata), des températures journalières maximales et minimales pour le climat « actuel » (Meteonorm, 2020).....	133

Figure 83: Évolution, pour la localité du cas d'étude (Tlemcen-Zenata), de la température extérieure mensuelle moyenne pour différents horizons climatiques et deux scénarios d'émission : (a) scénario RCP4.5. (b) scénario RCP8.5	142
Figure 84: Évolution, pour la localité du cas d'étude (Tlemcen-Zenata), des températures journalières maximales et minimales pour : le climat actuel (a) ; le climat « futur » 2050/RCP4.5 (b) ; et le climat « futur » 2050/RCP8.5 (c) (Meteonorm, 2020)	143
Figure 85: Diagramme du processus de calibration du modèle de simulation.....	145
Figure 86: Comparaison de l'évolution des températures intérieures mesurées et simulées de la salle de classe 3 pour la valeur retenue du paramètre d'entrée du modèle à l'issue du processus de calibration et pour chaque période de la campagne de mesures.....	149
Figure 87: Évolution de la demande énergétique de chauffage et de refroidissement du bâtiment existant (sans mesures d'adaptation) entre le climat « actuel » et les climats « futurs » 2050 et 2080 pour les deux scénarios d'émission RCP4.5 et RCP8.5	152
Figure 88: Efficacité des mesures d'adaptation séparées (MAS) en comparaison aux critères du standard EnerPHit, dans les climats « actuel » et « futurs »	160
Figure 89: Efficacité des mesures d'adaptation cumulées (MAC) en comparaison aux critères du standard EnerPHit, dans les climats « actuel » et « futurs »	166
Figure 90: Degrés-jours pour le chauffage et refroidissement dans les pays d'Afrique du Nord (Amara et al., 2007).....	195
Figure 91: Répartition des degrés-jours annuels de chauffage à 18,3 °C (Mourshed, 2016)	195
Figure 92: Répartition des degrés-jours annuels de refroidissement à 18,3 °C (Mourshed, 2016)	196
Figure 93: Sélection de la localisation dans le logiciel Meteonorm (Meteonorm, 2020)	197
Figure 94: Aperçu sur la sélection des sources de données dans le logiciel Meteonorm (Meteonorm, 2020).....	198
Figure 95: Aperçu sur les paramètres de l'analyse climatique dans le logiciel Meteonorm (Meteonorm, 2020).....	199
Figure 96: Aperçu sur les options de sortie dans le logiciel Meteonorm (Meteonorm, 2020)	200
Figure 97: Aperçu des options d'exportation dans le logiciel Meteonorm (Meteonorm, 2020)	200
Figure 98: Photos du kit de mesure utilisé dans cette étude (source : l'auteur)	203
Figure 99: Exemple de données enregistrées par les appareils de mesures et extraites de la carte SD.....	203
Figure 100: Aperçu des données Meteonorm ouvertes dans Microsoft Excel.....	204
Figure 101: La carte microcontrôleur programmable « Arduino Pro mini »	209

Figure 102: Capteur de température et d'humidité « DHT22 »	210
Figure 103: Module de l'horloge temps réel (RTC).....	211
Figure 104: Module lecteur de carte mémoire SD	211

Liste des acronymes & abréviations

ADEME	Agence Française de la Transition Ecologique
AEA	Amélioration de l'étanchéité à l'air (Mesure d'adaptation)
AGCM	Modèle de Circulation Générale Atmosphérique (<i>Atmosphere General Circulation Model</i>)
AIE	Agence Internationale de l'Energie
ANRH	Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (Algérie)
AOGCM	Modèle de circulation atmosphérique et océanique (<i>Atmosphere-Ocean General Circulation Model</i>)
AR	Rapport d'évaluation du GIEC (<i>IPCC Assessment Report</i>)
ASHRAE	Association américaine des ingénieurs en chauffage, réfrigération et climatisation (<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers</i>)
AVR	Régulateur de tension automatique (<i>Automatic Voltage Regulator</i>)
BAU	Scénario de tendance actuelle (<i>Business As Usual</i>)
BCA	Agence du bâtiment et de la construction (<i>Building and Construction Authority, Singapore</i>)
BES	Simulation énergétique des bâtiments (<i>Building Energy Simulation</i>)
BREEAM	Méthode d'évaluation environnementale des bâtiments (<i>Building Research Establishment Environmental Assessment Method, Great Britain</i>)
CCNUCC	Convention-cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques
CdP	Conférence des Parties
CGCS	Coefficient de gain de chaleur solaire
CMIP5	Projet d'intercomparaison de modèles climatiques couplés (<i>Coupled Model Intercomparison Project Phase 5</i>)
CVC	Chauffage, Ventilation et Climatisation
DHT22	Capteur numérique d'humidité et de température (<i>Digital Humidity and Temperature</i>)
DOE	Ministère américain de l'Énergie (<i>Department of Energy</i>)
DTR	Document Technique Réglementaire (Algérie)

EPW	Fichier météorologique pour le moteur de simulation EnergyPlus (<i>EnergyPlus Weather File</i>)
ESM	Modèle de système terrestre (<i>Earth System Model</i>)
EWC	Site Web d'information sur l'efficacité énergétique des fenêtres (<i>Efficient Windows Collaborative</i>)
Exaflop	Unité de mesure de quantité de calculs numériques
FAR	Premier rapport d'évaluation du GIEC (<i>First Assessment Report</i>)
GEBA	Archive du bilan énergétique global (<i>Global Energy Balance Archive</i>)
GES	Gaz à Effet de Serre
GIEC	Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du Climat
HPE	Haute Performance Energétique
HQE	Haute Qualité Environnementale
IPCC	Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du Climat (<i>Intergovernmental Panel of experts on Climate Change</i>)
ITE	Isolation Thermique par l'Extérieur (Mesure d'adaptation)
LEED	Label "Leadership en énergie et conception environnementale" (<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i>)
LoE	Faible émissivité (<i>Low-Emissivity</i>)
MAC	Mesures d'adaptation cumulées
MAP	Plan d'Action pour la Méditerranée (<i>Mediterranean Action Plan</i>)
MAS	Mesures d'adaptation séparées
MATE	Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (Algérie)
MCG	Modèle Climatique Global
MCR	Modèle Climatique Régional
MedECC	Réseau d'experts méditerranéens sur le changement climatique et environnemental (<i>Mediterranean Experts on Climate and environmental Change</i>)
MEM	Ministère de l'Énergie et des Mines (Algérie)
MHC	Mode hybride de conditionnement d'air (Mesure d'adaptation)
NASA	Administration américaine de l'aéronautique et de l'espace (<i>National Aeronautics and Space Administration</i>)
NOAA	Administration américaine des océans et de l'atmosphère (<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>)
OMB	Installation de surplombs d'ombrage (Mesure d'adaptation)

OMM	Organisation Météorologique Mondiale (<i>World Meteorological Organization</i>)
ONU	Organisation des Nations Unies
PNUE	Programme des Nations Unies pour l'Environnement
PRG	Potentiel de Réchauffement Global des GES
RCP	Trajectoire de concentration représentative (<i>Representative Concentration Pathway</i>)
RTC	Horloge Temps Réel (<i>Real-Time Clock</i>)
SAR	Deuxième rapport d'évaluation du GIEC (<i>Second Assessment Report</i>)
SRES	Rapport spécial du GIEC sur les scénarios d'émissions (<i>Special Reports on Emissions Scenarios</i>)
TAR	Troisième rapport d'évaluation du GIEC (<i>Third Assessment Report</i>)
THPE	Très Haute Performance Energétique
TL	Coefficient de transmission lumineuse
TMY	Année météorologique type (<i>Typical Meteorological Year</i>)
UFP	Utilisation de fenêtres performantes (Mesure d'adaptation)
UNEP	Programme des Nations Unies pour l'Environnement (<i>United Nations Environment Programme</i>)
UNFCCC	Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>)
VMC	Ventilation Mécanique Contrôlée
VNN	Ventilation naturelle nocturne (Mesure d'adaptation)
WMO	Organisation Météorologique Mondiale (<i>World Meteorological Organization</i>)
ZITC	Zone Inter-Tropicale de Convergence

Liste des symboles & unités

Coefficient de performance énergétique (<i>Coefficient of Performance</i>)	CoP	-
Coefficient de transmission lumineuse	TL	-
Coefficient de transmission solaire (Solar Heat Gain Coefficient)	SHGC	-
Coefficient de transmission thermique	U	[W/m ² .K]
Coefficient de transmission thermique du châssis des fenêtres	U_F	[W/m ² .K]
Coefficient de transmission thermique des fenêtres	U_W	[W/m ² .K]
Coefficient de transmission thermique des portes	U_P	[W/m ² .K]
Coefficient de transmission thermique du vitrage	U_g	[W/m ² .K]
Coefficient de variation de l'erreur quadratique moyenne (<i>Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error</i>)	CV(RMSE)	-
Coefficient du gain de chaleur solaire (<i>Solar Heat-Gain Coefficient</i>)	SHGC	-
Conductivité thermique	λ	[W/m.K]
Donnée mesurée	m_i	-
Donnée simulée	s_i	-
Erreur moyenne normalisée (<i>Normalized Mean Bias Error</i>)	NMBE	-
Erreur quadratique moyenne (<i>Root-Mean-Square Error</i>)	RMSE	-
Excentricité de la Terre	e	-
Métabolisme	-	met
Moyenne des données mesurées	\bar{m}	-
Nombre de valeurs mesurées	n	-
Parties par milliard (<i>parts per billion</i>)	-	ppb
Parties par million (<i>parts per million</i>)	-	ppm

Pression	-	Pa
Puissance unitaire	P_{unit}	W
Résistance superficielle extérieure de paroi	R_e	[m ² .K/W]
Résistance superficielle intérieure de paroi	R_i	[m ² .K/W]
Résistance thermique de paroi	R_T	[m ² .K/W]
Taux horaire de renouvellement du volume d'air du bâtiment ou d'une zone de bâtiment dans les conditions normales de pression (<i>Air Changes per Hour</i>)	-	ACH
Taux horaire de renouvellement du volume d'air du bâtiment ou d'une zone de bâtiment à une différence de pression de 50 Pa entre l'intérieur et l'extérieur (<i>Air Changes per Hour</i>)	-	ACH ₅₀
Température	Temp	[°C]
Température de l'air intérieure	T_a	[°C]
Température intérieure de paroi	T_p	[°C]
Température résultante sèche	T_{rs}	[°C]
Tonne d'équivalent pétrole	-	[Tep]

Introduction générale

Contexte général

Selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), « le réchauffement du système climatique est sans équivoque » (IPCC, 2013).

Le secteur du bâtiment occupe une place centrale dans ce débat en raison de sa contribution significative à la consommation d'énergie et aux émissions de GES. En effet, ce secteur est responsable de près de 47% de la consommation annuelle totale d'énergie (Figure 1), ce qui en fait un acteur majeur du réchauffement climatique.

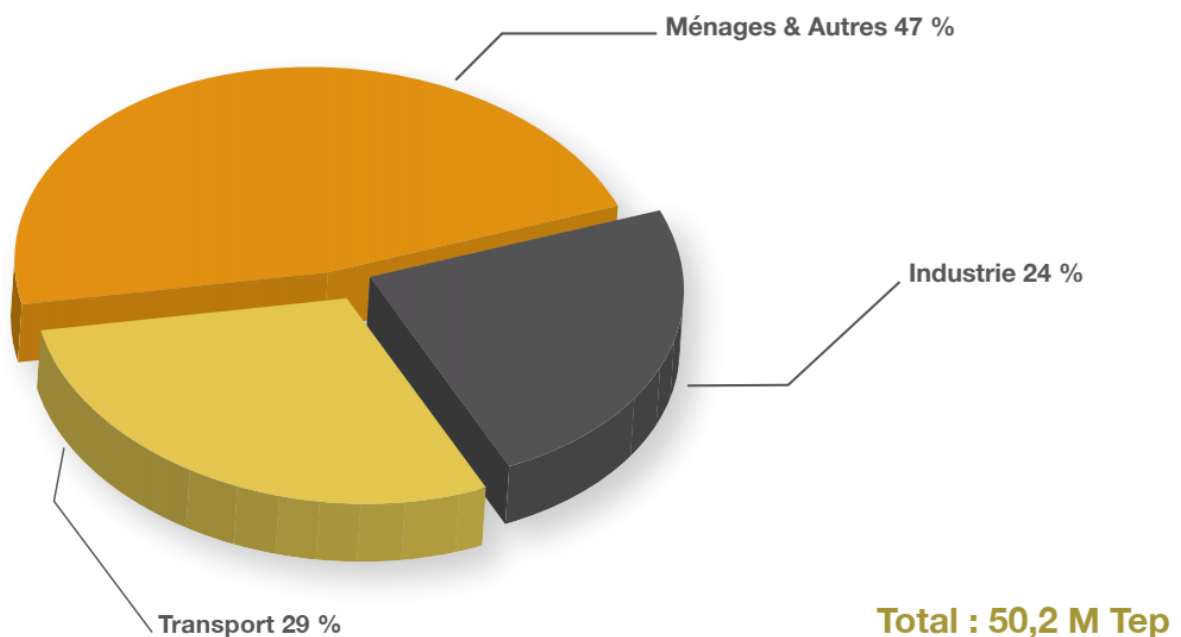


Figure 1: Structure de la consommation finale d'énergie par secteur d'activité (MEM, 2022)

Parallèlement, le bâtiment est une enveloppe qui protège l'homme contre les différents aléas naturels, y compris les effets du changement climatique. Il est donc crucial que le bâtiment soit conçu et adapté pour faire face aux conditions climatiques actuelles et futures, tout en maintenant un niveau de confort thermique intérieur approprié pour ses occupants.

Cependant, la plupart des bâtiments existants ont été conçus et construits pour répondre aux conditions climatiques spécifiques de leur localisation géographique, sans considération des conditions extérieures futures qui peuvent différer considérablement du climat pour lequel ces bâtiments ont été initialement conçus.

Par ailleurs, le réchauffement climatique a un impact significatif sur la planète, avec des conséquences telles que des canicules répétées, des inondations, des sécheresses, etc. Les conséquences de ces événements naturels multiples mettent en évidence le manque d'adaptation de nos bâtiments aux aléas naturels et aux conséquences du changement climatique futur. Dans ce contexte, les scientifiques prévoient une augmentation de la température de l'ordre de 1,0°C à 5,7°C d'ici 2100 par rapport à l'année de référence de 1990 (IPCC, 2021).

De nombreuses études sur le bâtiment dans le contexte du changement climatique (Cellura et al., 2018; Chan, 2011; Huang & Hwang, 2016; Jylhä et al., 2015; Pierangioli et al., 2017; Ren et al., 2011; Shourav et al., 2018; Vasaturo et al., 2018) prévoient une augmentation de la demande d'énergie pour le refroidissement et une diminution de la demande d'énergie pour le chauffage, principalement due à l'augmentation de la température extérieure.

Un bâtiment produit de 80-90% de CO₂ pendant son exploitation, principalement en raison du chauffage, du refroidissement des locaux, de l'eau chaude, de l'éclairage et des autres appareils domestiques (Ren et al., 2011).

Dans ce contexte, la consommation finale d'énergie en Algérie était de l'ordre de 50,2 M Tep en 2021. Cette consommation a enregistré une augmentation de 8,0% par rapport à 2020, tirée notamment par l'électricité (+12,7 %) et le gaz naturel (+6,5 %) (MEM, 2022).

Différentes causes expliquent cette augmentation. Tout d'abord, la croissance substantielle de la population. Ainsi la population de l'Algérie est passée de 14 millions en 1970 à plus de 43 millions en 2020 et serait de 60 millions en 2050 (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2022). Cette croissance démographique rapide a engendré une augmentation de la demande en logement, et par conséquent une augmentation de la demande énergétique.

Entre autres, un meilleur revenu et une énergie disponible et subventionnée par l'état, ont favorisé l'augmentation du niveau de vie et le désir d'un meilleur confort thermique. Ce désir croissant de confort des individus a influencé la demande énergétique, car de nombreux équipements de confort dépendent de l'utilisation de cette ressource.

Étant donné que 99% des foyers en Algérie sont raccordés au système électrique, cela a favorisé l'augmentation de la consommation énergétique pour le refroidissement. Parallèlement, l'essor du nombre d'appareils électriques dans chaque foyer a également contribué à l'augmentation de la consommation énergétique. De plus, l'utilisation d'appareils électriques non économiques, tels que les lampes à incandescence et les climatiseurs bon marché, a également joué un rôle significatif. En outre, le manque de sensibilisation et de culture en matière d'efficacité énergétique a conduit à une utilisation non optimale de l'énergie (Missoum et al., 2014).

Par ailleurs, la taille de la famille algérienne a connu une sensible diminution au fil du temps. Le taux d'occupation du logement a atteint environ 4,4 en 2021 (APS, 2022), tandis qu'il était d'environ 6,3 en 1998 et de 5,8 en 2008 respectivement (Zitoun Madani, 2012). De plus, la réduction de la taille des familles s'est accompagnée d'un phénomène d'appropriation de maisons plus spacieuses, entraînant une augmentation de la surface habitable des habitations et, par conséquent, un plus grand volume à chauffer et à refroidir.

Cette augmentation de la consommation d'énergie ne semble pas s'atténuer. En effet, (Ghedamsi et al., 2016) prévoient une augmentation de 145 % de la consommation d'énergie entre 2008 et 2040, passant ainsi respectivement de 73,23 TWh à 179,78 TWh.

Compte tenu de tous ces facteurs, le système électrique en Algérie se voit fortement sollicité, une tendance qui est vouée à s'accroître dans les années à venir. Les perturbations dans

l'approvisionnement en électricité, déjà constatées, seront plus importantes, en particulier pendant les heures de pointe, avec des conséquences potentiellement significatives.

En Algérie, la consommation d'électricité a connu une augmentation de l'ordre de 477 % par habitant de 1975 à 2010 (Bouznit & Pablo-Romero, 2016). Cette augmentation de la consommation d'électricité était responsable à elle seule de 42 % des émissions de gaz à effet de serre en 2012 (Figure 2).

Dans ce contexte, l'Algérie prévoit « une réduction des émissions de gaz à effet de serre de 7 à 22%, à l'horizon 2030, par rapport à un scénario de référence (Business As Usual – BAU) » (UNFCCC, 2015).

Le secteur du bâtiment représente ainsi un potentiel important d'économie d'énergie. Le chauffage et le refroidissement représentent à eux seuls 70% de la consommation énergétique totale des bâtiments en Algérie (Imessad et al., 2017).

L'augmentation de la demande d'énergie pour le refroidissement et la diminution de la demande d'énergie pour le chauffage engendrent une mutation dans la nature de l'approvisionnement énergétique. En raison de la typologie des appareils utilisés pour le chauffage et le refroidissement, on observe une augmentation de la consommation d'électricité et une réduction de celle du gaz naturel. Cependant, cela n'est pas sans conséquence sur l'environnement, car le rendement de production de l'électricité est relativement faible, environ 40%. En d'autres termes, la production d'1 kWh d'électricité nécessite environ deux fois et demi (2,5) plus d'énergie primaire que la production d'1 kWh de gaz naturel (Energie Plus Le Site, 2011). Ainsi, cette transition conduit à une augmentation de la consommation d'énergie primaire nécessaire pour satisfaire la demande énergétique, ce qui a des conséquences sur l'environnement et sur la durabilité des ressources énergétiques.

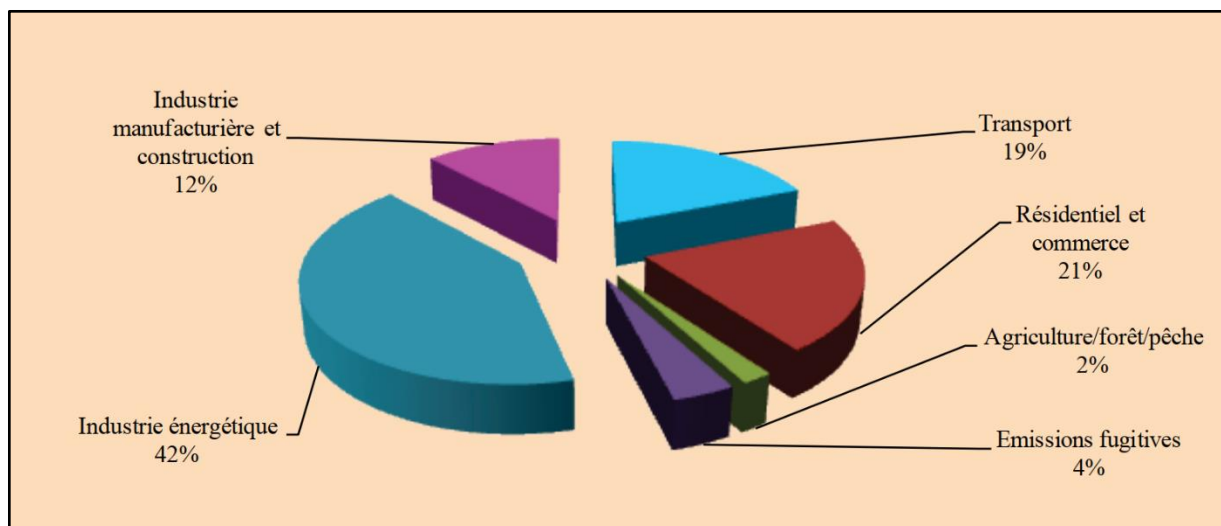


Figure 2: Répartition des émissions de CO₂ dues à l'utilisation de l'énergie (MATE, 2010)

Problématique de recherche

L'Algérie, en raison de sa position géographique, est très vulnérable aux changements climatiques. De nombreuses études projettent une forte augmentation de la température dans la zone

méditerranéenne, ainsi que d'autres impacts tels que des risques d'inondations, un accroissement du stress thermique, une diminution des précipitations, entre autres (Pierangioli et al., 2017).

La durée de vie typique d'un bâtiment est estimée entre 60 et plus de 100 ans (Yau & Hasbi, 2013). Par conséquent, les bâtiments existants demeureront opérationnels pendant de nombreuses années. Cependant, ils n'ont généralement pas été conçus initialement pour faire face aux conditions climatiques futures induites par le réchauffement global.

Le changement climatique rapide observé dans les dernières décennies est projeté d'être plus important dans les années à venir. Les bâtiments existants doivent donc être adaptés pour faire face à des températures plus élevées tout en améliorant le confort intérieur de leurs utilisateurs.

« Bien qu'il soit peu probable que l'exposition aux changements climatiques potentiels soit évitée, la réduction de la vulnérabilité peut être obtenue par l'amélioration de la capacité d'adaptation, c'est-à-dire la capacité de réagir à la variabilité et aux changements climatiques, de réduire ou d'atténuer la probabilité et l'ampleur des résultats néfastes, de faire face aux conséquences ou de tirer parti des opportunités » (Ren et al., 2011)

« Si l'importance de l'atténuation du changement climatique est désormais reconnue par les acteurs immobiliers, l'adaptation à un climat changeant l'est encore insuffisamment » (Observatoire de l'immobilier Durable, 2023).

Plusieurs études ont évalué l'impact du changement climatique sur les bâtiments et ont proposé des alternatives pour adapter les bâtiments existants aux effets du changement climatique. Ces mesures d'adaptation ont généralement été évaluées pour minimiser autant que possible la consommation d'énergie, notamment pour le chauffage et le refroidissement.

Étant donné que les problématiques liées aux changements climatiques doivent être étudiées à une échelle locale (Dolinar et al., 2010; Filippín et al., 2018), il existe très peu de connaissances sur l'impact du changement climatique et l'effet des mesures d'adaptation sur la demande en énergie de chauffage et de refroidissement dans les bâtiments en Algérie. La position géographique de l'Algérie, ses spécificités climatiques (présence de plusieurs climats), ainsi que ses reliefs ont fait d'elle une zone d'étude importante de lutte et d'adaptation au changement climatique.

Bien que plusieurs normes et standards ont établi des lignes directrices pour l'adaptation et l'atténuation dans le secteur du bâtiment et réduire ainsi leurs impacts environnementaux, peu d'études scientifiques ont évalué l'efficacité de certaines mesures d'adaptation et d'atténuation, en particulier celles relatives aux principaux standards de rénovation énergétique utilisés dans le monde.

De ce qui précède, nous avons été conduits à poser les questions de recherche suivantes :

- i. Quel sera l'impact du changement climatique sur les bâtiments en Algérie ?
- ii. Quel standard international peut-on prendre comme référence pour évaluer l'efficacité des mesures d'adaptation des bâtiments existants en Algérie ?
- iii. Quelle catégorie de bâtiments existants demeure prioritaire dans ce contexte ?

- iv. Quels sont les mesures adéquates pour adapter les bâtiments existants au changement climatique en Algérie et atténuer leur consommation énergétique et leurs émissions de gaz à effet de serre ?

Hypothèse de travail

L'intégration de mesures d'adaptation au changement climatique conformes à des normes énergétiques spécifiques pourrait avoir un impact significatif sur la réduction de l'empreinte carbone des bâtiments, en améliorant leur efficacité énergétique et leur résilience face aux impacts du changement climatique. Une telle intégration requiert une évaluation scientifique rigoureuse de l'efficacité des mesures d'adaptation et de leur alignement avec les normes énergétiques existantes. Ceci pourra permettre une prise de décision éclairée en matière de construction durable et résiliente.

Dans cette perspective, le standard EnerPHit serait approprié pour évaluer les mesures d'adaptation du bâtiment au réchauffement climatique. Il permettrait d'adapter les bâtiments aux conditions futures tout en respectant une limite de la consommation énergétique.

Objectif de la recherche

L'objectif principal de la présente thèse est d'évaluer l'impact du réchauffement global sur les consommations énergétiques et le confort thermique d'un bâtiment éducatif existant et d'analyser l'efficacité de diverses mesures d'adaptation se résumant principalement à sa rénovation thermique et énergétique. Dans ce cadre, nous avons eu recours à la modélisation et à la simulation dynamique du comportement thermique et des performances énergétiques du bâtiment étudié à l'aide du logiciel « DesignBuilder-EnergyPlus » à différents horizons climatiques et en appliquant les critères du standard de rénovation énergétique « EnerPHit » comme cadre de référence.

Cette étude a pour ambition d'apporter une contribution significative à la recherche scientifique sur l'analyse de l'impact du changement climatique sur les bâtiments en Algérie et l'évaluation de solutions d'adaptation appropriées. L'étude examine en effet l'efficacité des mesures d'adaptation en se focalisant sur la rénovation énergétique des bâtiments éducatifs représentant un parc important en Algérie, dans une région considérée comme un « *hot spot* » du changement climatique, la Méditerranée.

Elle permettrait, dans un cadre de valorisation future, de constituer une approche de référence pour la conception de bâtiments éducatifs durables et résilients, en un mot des bâtiments « adaptés » au changement climatique présent et futur.

Méthodologie de la recherche

L'élaboration du présent travail de recherche s'est déroulée suivant différentes étapes clés :

- i. une recherche bibliographique pour comprendre les différents aspects de la thématique et permettre l'élaboration de la problématique et de la méthodologie de recherche ;
- ii. choix d'un cas d'étude correspondant aux critères de choix suite à l'élaboration de la

- problématique et de la méthodologie de recherche ;
- iii. modélisation et simulation du fonctionnement thermique et énergétique du bâtiment existant pour le climat actuel et pour différents horizons et scénarios climatiques à l'aide du logiciel de simulation dynamique « DesignBuilder-EnergyPlus » ;
 - iv. génération pour ce faire des fichiers météorologiques nécessaires (climat actuel et scénarios climatiques futurs) à l'aide du logiciel « Meteonorm » ;
 - v. étude des principaux standards de rénovation énergétique et sélection de mesures d'adaptation à évaluer ;
 - vi. simulation thermique et énergétique de différentes variantes du bâtiment existant correspondant à des combinaisons des mesures d'adaptation sectionnées et aux différents scénarios climatiques retenus ;
 - vii. évaluation de l'impact des mesures d'adaptation sélectionnées sur la demande énergétique du bâtiment pour les différents scénarios climatiques et comparaison aux normes des standards énergétiques étudiés.

Structure de la thèse

La présente thèse est divisée en quatre chapitres principaux, en sus d'une introduction et d'une conclusion générales :

- le premier chapitre s'intéresse à l'étude du changement climatique, qui constitue un enjeu majeur pour notre planète et notre société. Les aspects physiques du changement climatique sont examinés, ainsi que les causes et les conséquences de ce phénomène.
- le deuxième chapitre discute de l'interaction entre le secteur du bâtiment et le changement climatique, en s'appuyant sur les travaux précédents menés par des chercheurs et des scientifiques. Les théories et les modèles existants sont analysés, ainsi que les résultats des études les plus récentes. Les typologies d'impact ainsi que les principales mesures d'adaptation des bâtiments au changement climatique sont discutées.
- le troisième chapitre décrit la méthode et les outils de simulation utilisés dans cette recherche, qui se fonde sur une approche quantitative et qualitative. Les outils utilisés pour la collecte et l'analyse des données sont présentés.
- le quatrième chapitre présente les résultats des simulations menées, qui ont permis de mieux comprendre les impacts du changement climatique sur différents aspects de notre environnement et de notre société. Les résultats sont discutés en détail, en tenant compte des scénarios éventuels.

Chapitre I

Le changement climatique

1.1 Introduction

La première partie de ce chapitre se concentre sur les caractéristiques et les processus fondamentaux du climat. L'analyse des éléments influençant le climat, tels que la température, les précipitations, les vents et les modèles de circulation atmosphérique, permet de comprendre les mécanismes sous-jacents du système climatique.

Ensuite, la question essentielle du changement climatique est abordée. Les preuves scientifiques accumulées au fil des décennies indiquent de manière convaincante que la Terre connaît un réchauffement sans précédent. Les causes du changement climatique, principalement attribuables aux activités humaines telles que l'utilisation des combustibles fossiles et la libération de gaz à effet de serre, sont examinées. Les conséquences du changement climatique, notamment la montée du niveau de la mer, les événements météorologiques extrêmes, les perturbations des écosystèmes, sont également abordées.

La troisième partie de ce chapitre se focalise sur la modélisation climatique, un outil essentiel pour appréhender et prévoir l'évolution future du climat. Les principes et les méthodes de modélisation climatique, incluant la collecte de données, la formulation des équations et la représentation des processus, sont explorées. Dans une section dédiée, les différentes approches méthodologiques utilisées dans le cadre de la descente d'échelle de la modélisation climatique ont été examinées.

Par la suite, les changements climatiques observés et prévus sont discutés, en premier lieu à l'échelle globale puis une attention particulière est accordée à l'Algérie en analysant la tendance et l'intensité du changement climatique observées dans le pays. Cette analyse englobe l'étude des variations de température ainsi que des modifications des régimes pluviométriques.

1.2 Climat et météorologie

Le climat est généralement considéré comme l'étude statistique de la moyenne et de la variabilité de paramètres atmosphériques telle la température, l'humidité, les précipitations, le vent, sur une longue période, fixée à 30 ans par l'Organisation météorologique mondiale, pour une zone géographique précise (Cassou & Masson-Delmotte, 2015; WMO, 2016).

Le climat constitue la base sur laquelle reposent les systèmes de classification climatique, lesquels englobent les catégories de climats tropicaux, tempérés et désertiques, entre autres (Romm, 2016).

La météo, quant à elle, se réfère aux conditions atmosphériques à court terme dans un lieu précis, habituellement sur des intervalles temporels allant de quelques heures à quelques jours. Elle intègre des données relatives à la température, à l'humidité, à la vitesse du vent, la pression atmosphérique, aux précipitations, aux niveaux de couverture nuageuse, et autres paramètres connexes. En d'autres termes, la météo offre une description de l'état actuel de l'atmosphère et procure des prédictions pour les jours à venir (Cassou & Masson-Delmotte, 2015; Rohli & Vega, 2018).

1.3 Le système climatique et ses composantes

Le système climatique est constitué de cinq éléments principaux, à savoir l'atmosphère, l'hydrosphère, la cryosphère, la biosphère et la lithosphère (Figure 3). Chacune de ces composantes suit un processus évolutif à une échelle temporelle propre. D'un autre côté, tous les éléments interagissent entre eux avec des mécanismes dynamiques et physiques sur des échelles temporelles différentes (Chavaillaz, 2016). De par leurs échanges, ces différentes composantes conditionnent la création de différents climats sur Terre.

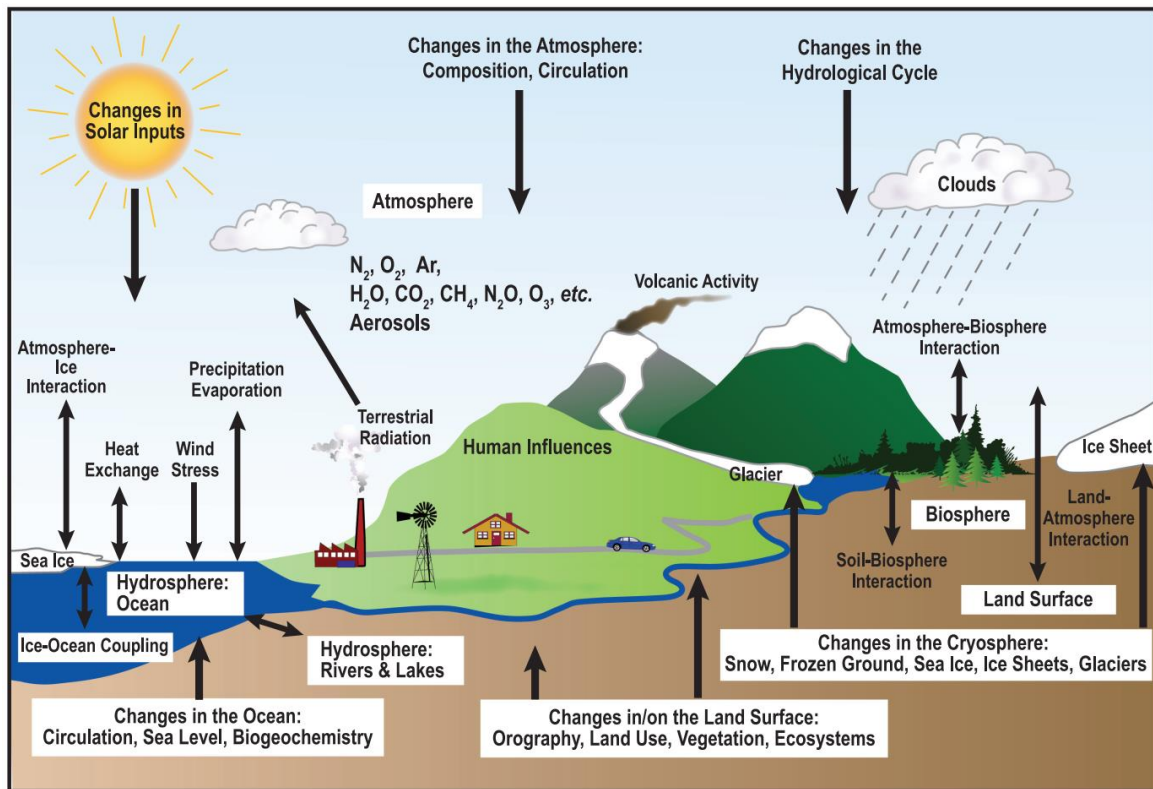


Figure 3: Représentation des composantes du système climatique et de leurs principales interactions (Treut et al., 2007).

Ce système climatique terrestre est approvisionné en énergie par le Soleil sous forme d'ondes électromagnétiques. Ainsi, la Terre reçoit au sommet de l'atmosphère un flux thermique d'une densité d'environ 1368 W/m² (Saha, 2008). Cette densité correspond à ce que reçoit une surface perpendiculaire au rayonnement émis par le Soleil au niveau du sommet de l'atmosphère. Cependant, en raison de la sphéricité de la Terre, l'énergie reçue sur tout le globe est quatre fois moins importante, et elle n'est pas répartie équitablement sur toute sa surface. Cette énergie est maximale dans les basses latitudes (à l'équateur) et minimale en hautes latitudes (les pôles). Ce déséquilibre de répartition d'énergie sera en partie diminué par les circulations atmosphérique et océanique.

1.3.1 L'atmosphère

L'atmosphère est la couche d'air qui enveloppe la Terre. Cette couche gazeuse est essentielle pour la régulation de la température sur Terre. Elle est constituée principalement d'azote

(N₂=78%), d'oxygène (O₂= 21%) et de gaz rares (1%). Parmi ces gaz rares, on trouve l'argon (Ar=0.9%) qui représente le plus grand volume ainsi que d'autre gaz en trace infime tel le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), le monoxyde de carbone (CO), l'ozone (O₃), etc.(Foucault, 2009).

La circulation atmosphérique répartit l'énergie solaire sur le globe et contribue à la modération des températures entre les zones polaires et équatoriales (Jacques & Le Treut, 2011). L'air chauffé et chargé d'humidité au niveau de l'équateur va monter, se refroidir et se condenser en haute altitude du fait des températures froides, ce qui engendre des précipitations à l'équateur. Cette zone est appelée « zone intertropicale de convergence (ZITC) ».

Atteignant une certaine altitude cet air désormais sec et froid ne peut plus s'élever davantage en raison de la présence de la tropopause¹. En conséquence, il se répartit en deux directions, vers le Nord et le Sud de l'équateur (Figure 4) et entreprend un mouvement descendant en direction des latitudes comprises entre 20° et 30° Nord et Sud. Cette descente marque la création de zones de « subsidence² », lesquelles se caractérisent par des climats désertiques (Mathez & Smerdon, 2018).

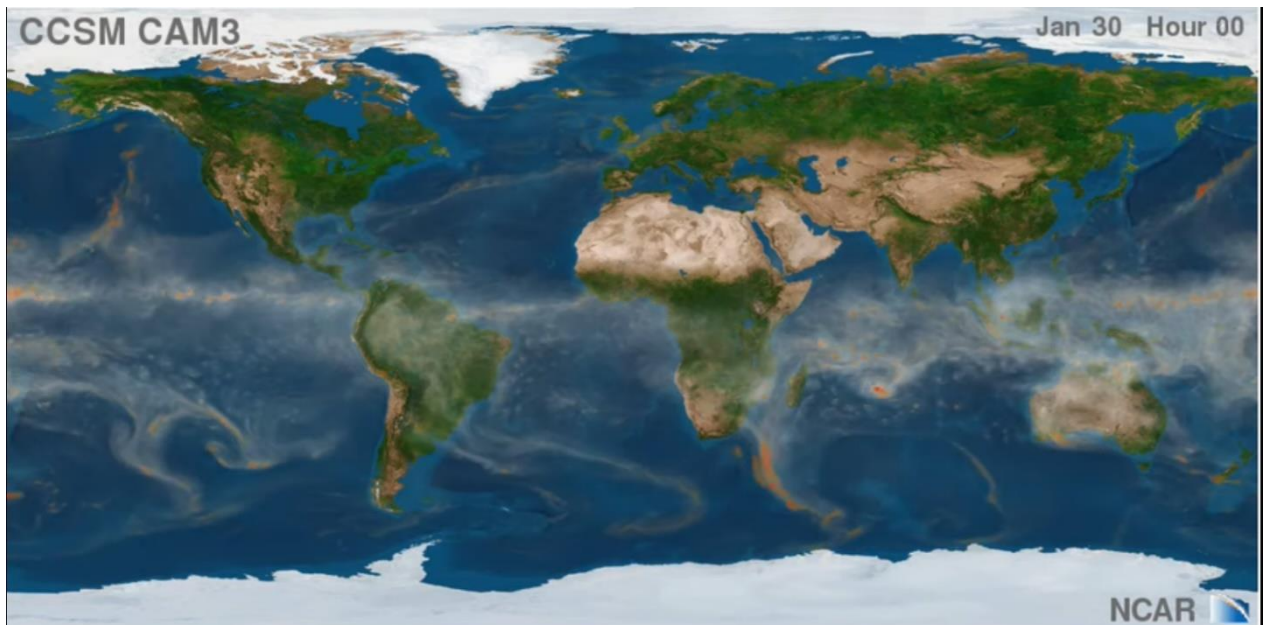


Figure 4: Image satellite de la formation de nuages condensés dans la région ZITC (NCAR, 2023)

¹ Couche de l'atmosphère terrestre située à la limite supérieure de la troposphère, la couche la plus basse de l'atmosphère où se produisent la plupart des phénomènes météorologiques. La tropopause est une zone de transition où la température de l'atmosphère cesse de diminuer avec l'altitude et devient plus stable dans la stratosphère, la couche atmosphérique située au-dessus de la tropopause.

² Phénomène symétrique de la convection, la subsidence est la descente d'air froid vers la surface. Cet air froid voyant la pression environnante croître au fur et à mesure de sa descente, se réchauffe de façon adiabatique, ce qui provoque l'évaporation des nuages traversés par cet air. L'apport d'air par subsidence est la cause de hautes pressions barométriques et la source de nombreux vents (Poitou et al., 2014).

Les mouvements ascendants et descendants de l'air dans l'atmosphère créent des cellules de circulation qui se forment autour de la zone intertropicale de convergence, appelée « cellule de Hadley ». D'autres cellules atmosphériques sont également formées par le même phénomène, notamment la « cellule de Ferrel » et la « cellule polaire » (Figures 5 et Figure 6). La force de Coriolis³ a une forte influence sur la circulation atmosphérique, car elle provoque la déviation des masses d'air en mouvement par rapport à leur trajectoire initiale.

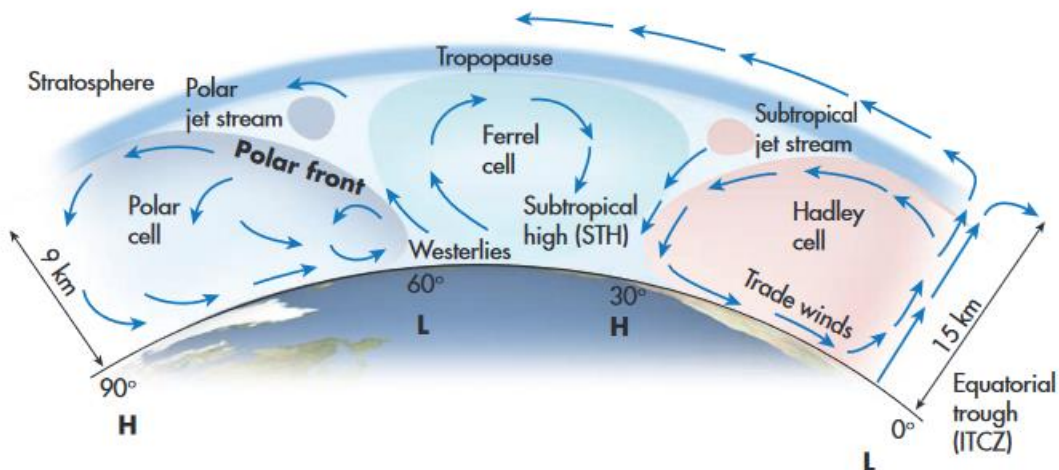


Figure 5: Coupe schématique des cellules atmosphériques (Arbogast, 2014)

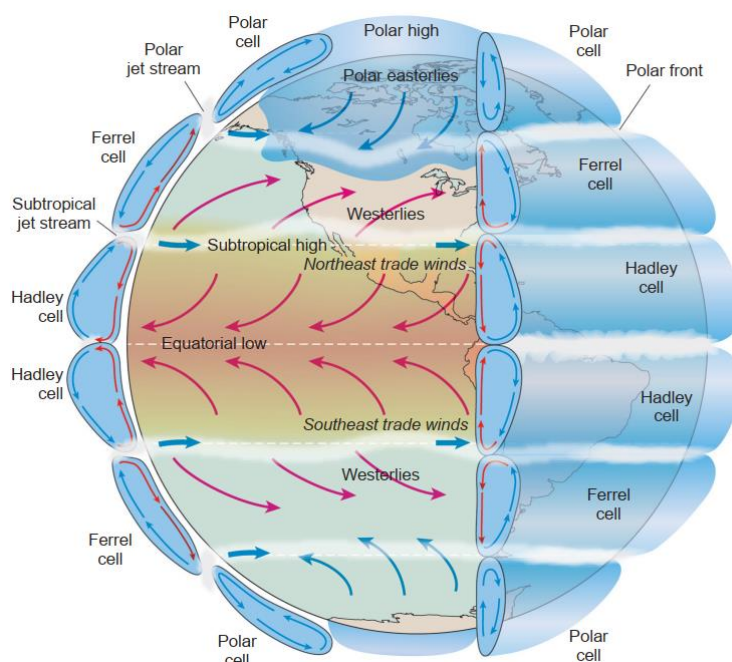


Figure 6: Représentation de la circulation atmosphérique de la Terre (Mathez and Smerdon 2018).

³ Définition dans : (Foucault, 2009)

1.3.2 Les océans

Parallèlement à la circulation atmosphérique qui régule la distribution de la chaleur à travers le globe, la circulation océanique, également connue sous le nom de « circulation thermohaline », est un mode de distribution d'eau de mer à travers la planète. Ce mouvement est influencé par la température et la salinité de l'eau, et est souvent décrit comme un "tapis roulant" océanique. Les eaux des zones équatoriales, ayant subi une évaporation importante, deviennent plus salines et plus chaudes. Elles sont ensuite transportées vers les régions polaires, où elles se refroidissent et plongent dans les profondeurs océaniques en raison de leur densité accrue. Cette eau froide et moins salée circule ensuite vers les régions équatoriales, où elle se réchauffe et remonte à la surface pour compléter le cycle (Arbogast, 2014). Cette circulation a un rôle essentiel dans la régulation de la température de la planète. La Figure 7 illustre la circulation océanique à travers la planète.

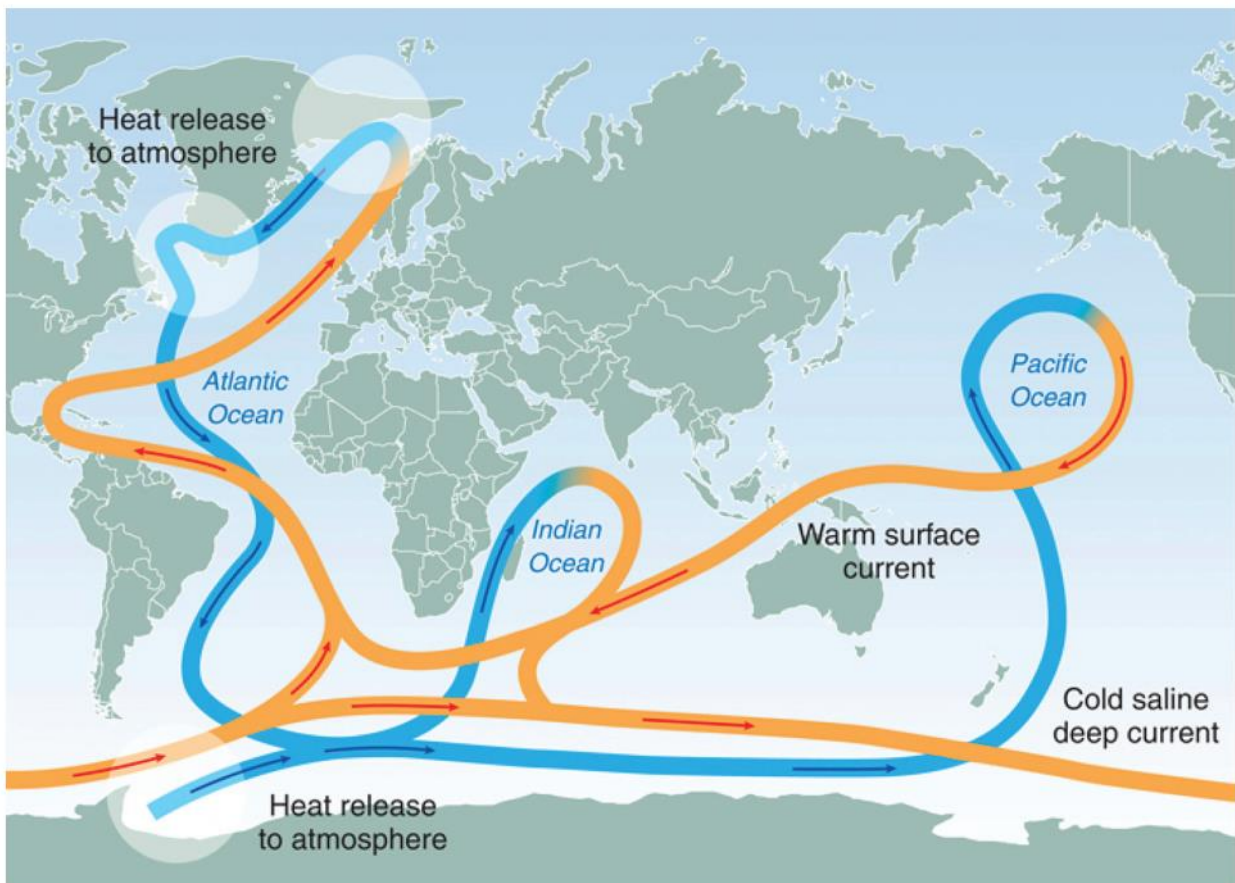


Figure 7: Représentation de la circulation thermohaline à travers la planète (Mathez & Smerdon, 2018)

1.4 Le changement climatique

1.4.1 Changement climatique naturel

1.4.1.1 *La variabilité naturelle du climat*

Les climats de la Terre sont conditionnés par des phénomènes naturels et peuvent changer au changement de ces derniers. Ces phénomènes pouvant influencer les climats de la planète ont généralement un effet combiné mais opèrent à des échelles de temps différentes.

Parmi ces phénomènes, certains sont liés aux mouvements orbitaux de la Terre et ont été théorisés par le mathématicien Milutin Milankovitch, désignés sous le terme de "Théorie de Milankovitch" (Figure 8). Le premier phénomène est l'**excentricité** (e) de l'orbite de la Terre autour du Soleil, qui varie tous les 100 000 ans entre un cercle parfait ($e=0$) et une ellipse ($e=0,06$). Lorsque la Terre se rapproche du Soleil pendant l'une de ses phases excentriques, elle reçoit davantage de rayonnement solaire, entraînant une augmentation de sa température. Ce mécanisme peut ainsi influencer le climat terrestre à long terme.

Le deuxième phénomène est associé à **la déclinaison** de l'axe terrestre, qui oscille entre $22^{\circ} 02'$ et $24^{\circ} 30'$ avec un cycle de 41 000 ans. L'angle d'inclinaison de l'axe de rotation terrestre est étroitement lié à l'amplitude des saisons. Un angle d'inclinaison plus important se traduit par des saisons plus marquées et contrastées (Foucault, 2009).

Le troisième phénomène étudié dans la théorie de Milankovitch est la **précession** des équinoxes. Cette notion fait référence au mouvement de l'axe de rotation de la Terre qui décrit une trajectoire conique autour de son axe vertical. La variation de la précession modifie la distance entre la Terre et le Soleil pendant une saison donnée. Il y a environ 11 000 ans, la Terre était plus proche du Soleil pendant l'été dans l'hémisphère nord, ce qui résultait d'un été plus chaud qu'actuellement.

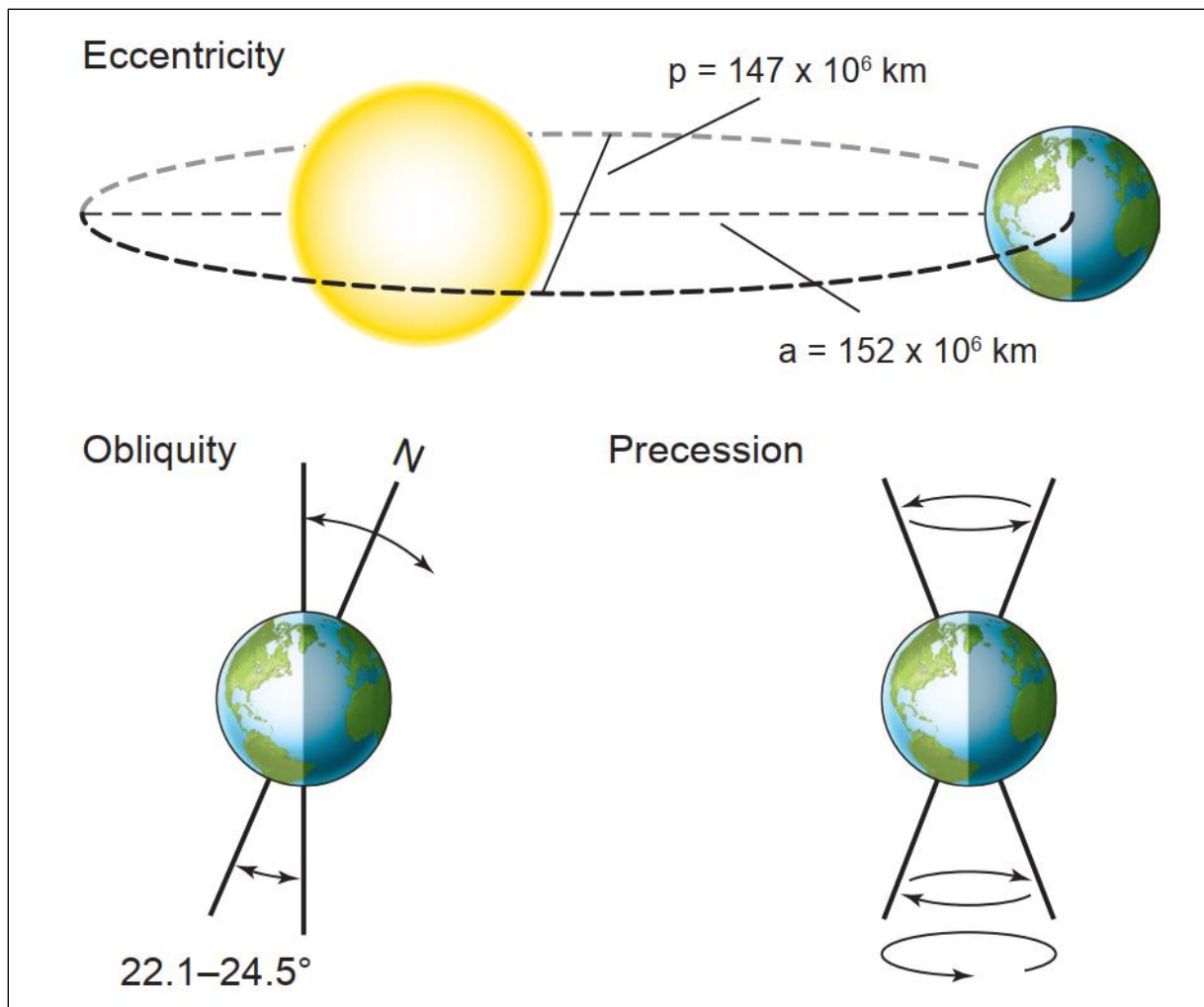


Figure 8: Les mouvements orbitaux de la Terre : précession, déclinaison et excentricité (Mathez & Smerdon, 2018).

Parmi ces phénomènes naturels d'autres sont liés directement à la variation de la composition de l'atmosphère, due par exemple aux éruptions volcaniques. Une éruption volcanique dégage d'importantes quantités de gaz à effet de serre ainsi que des particules très fines qui peuvent modifier l'apport énergétique et l'effet de serre, perturbant ainsi le bilan radiatif⁴ de la Terre (Figure 9). En effet, les cendres projetées dans l'atmosphère bloquent l'entrée du rayonnement solaire vers la Terre, la refroidissant, tandis que les gaz à effet de serre absorbent les rayons infrarouges émis par la Terre, la réchauffant. Il est ainsi toujours difficile d'évaluer le bilan radiatif de ces effets contradictoires.

Le Soleil étant la principale source d'énergie apportée au système climatique, il est également tout à fait naturel que des perturbations de l'activité solaire aient des conséquences sur les climats de la Terre (Foucault, 2009).

⁴ Le bilan radiatif de la Terre représente l'équilibre entre l'énergie solaire absorbée et l'énergie thermique émise.

L'ensemble de ces phénomènes exerce une influence sur les climats de la Terre, agissant de manière combinée mais à des échelles temporelles distinctes.

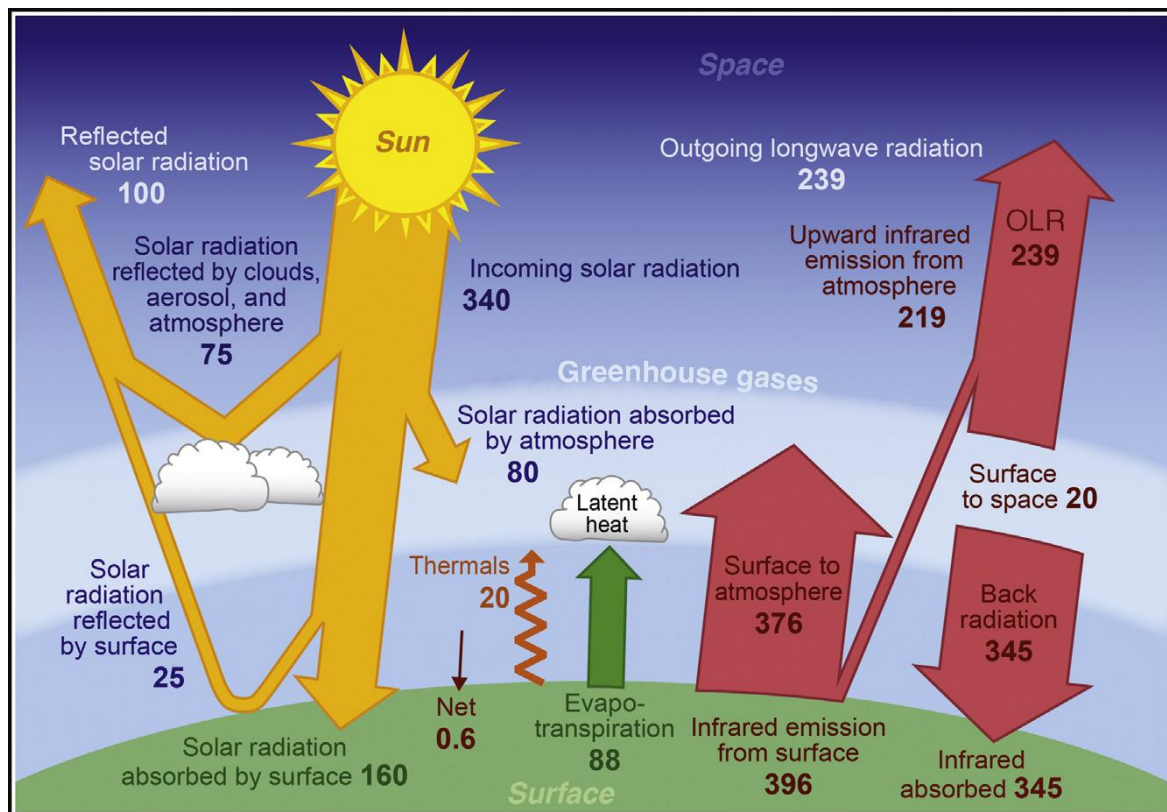


Figure 9: Effet de serre et bilan radiatif de la Terre (W/m²) (Hartmann, 2016).

1.4.1.2 L'effet de serre

L'effet de serre, illustré dans la Figure 9, est un phénomène naturel qui permet à la Terre de maintenir une température moyenne de 15°C, favorisant ainsi des conditions propices à la vie, et sans lequel la température serait de -19°C (Foucault, 2009). Ce mécanisme découle de la manière dont le Soleil émet de l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques, dont environ un tiers est renvoyé par l'atmosphère et la surface terrestre grâce au phénomène d'albédo⁵, tandis que le reste est absorbé et réémis sous forme de rayonnement infrarouge. Certains gaz, appelés gaz à effet de serre (GES), tels que la vapeur d'eau, le méthane (CH₄) ou le dioxyde de carbone (CO₂), se trouvent naturellement dans l'atmosphère terrestre et piègent cette énergie, ce qui permet de maintenir une température favorable à la vie sur notre planète (Romm, 2016).

Le Tableau 1 indique les principaux gaz à effet de serre composant l'atmosphère terrestre et leur potentiel de réchauffement global (PRG) qui permet la comparaison de leurs effets de serre respectifs relativement au CO₂ qui est le gaz de référence avec un PRG égal à 1.

⁵ Albédo : « la proportion de rayonnement solaire renvoyé dans l'espace sans modification » (Foucault, 2009).

Tableau 1: Les principaux gaz à effet de serre et leur PRG (Kershaw, 2017).

GES	Symbole	Durée de vie (an)	PRG
Dioxyde de carbone	CO ₂	100	1
Méthane	CH ₄	12.4	34
Oxyde nitreux	N ₂ O	121	298
Hydrofluorocarbone	HFC-134a	13.4	1550
Chlorofluorocarbone	CFC-11	45	5380
Tétrafluorure de carbone	CF ₄	50 000	7350
Hexafluorure de soufre	SF ₆	3200	22 800

1.4.1.3 Le forçage radiatif

Le forçage radiatif a traditionnellement été défini comme le changement instantané du flux d'énergie à la tropopause résultant d'un changement d'une composante externe au système climatique (National Research Council, 2010).

L'effet global des gaz, des particules atmosphériques et de l'utilisation des sols est individuellement converti en forçage radiatif, exprimé en Watt par mètre carré (W/m²). Cette mesure quantifie la perturbation de l'équilibre énergétique de la planète induite par chaque facteur externe. Lorsqu'il est positif, cela entraîne un réchauffement du système climatique ; lorsqu'il est négatif, cela provoque un refroidissement (Cassou & Masson-Delmotte, 2015)

1.4.2 Changement climatique anthropique

Depuis le début de l'ère industrielle, les activités humaines, appelées "anthropiques", ont contribué à une forte augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Cette augmentation des gaz anthropiques, qui accentuent l'effet de serre naturel, entraîne une rétention accrue de l'énergie sous forme de rayonnement infrarouge dans l'atmosphère terrestre (Figure 10), ce qui provoque une élévation de la température de la Terre (Segovia-Kueny, 2009).

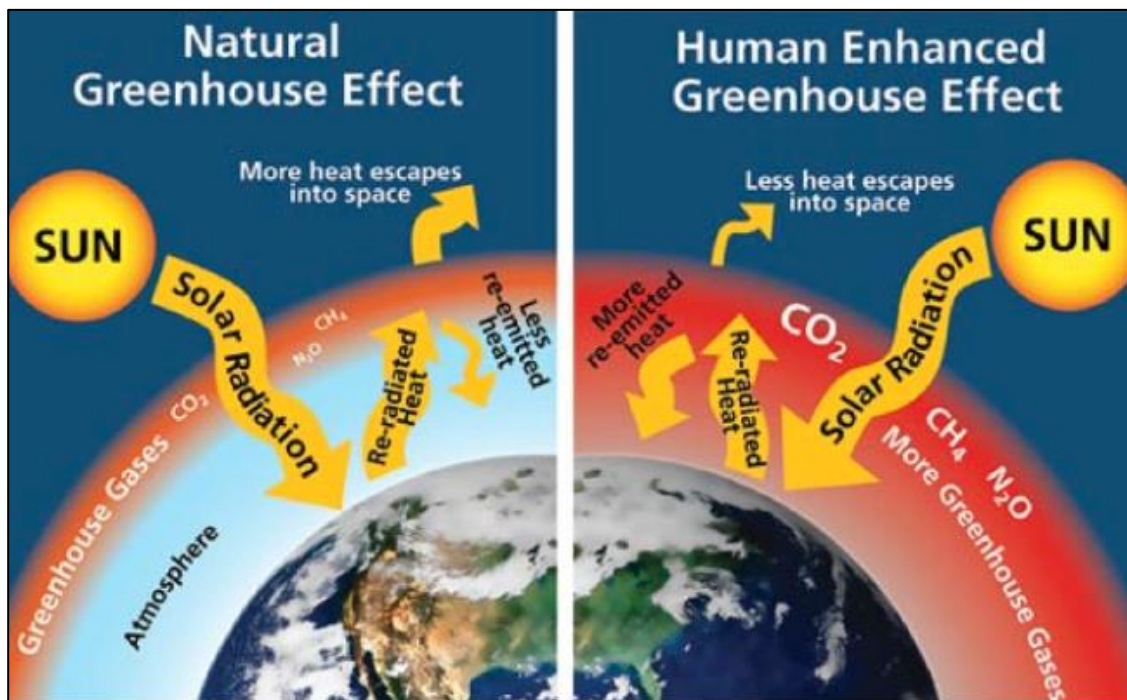


Figure 10: Augmentation des émissions anthropiques des gaz à effet de serre et accentuation de l'effet de serre naturel (Shafer, 2017)

Des études récentes ont montré que les augmentations de températures sont en corrélation direct avec l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. La Figure 11 montre une comparaison des niveaux atmosphériques de dioxyde de carbone (CO₂) avec les données de température. La Figure 12 illustre une comparaison des températures simulée, mesurée et reconstituée par rapport à celle de 1850-1900.

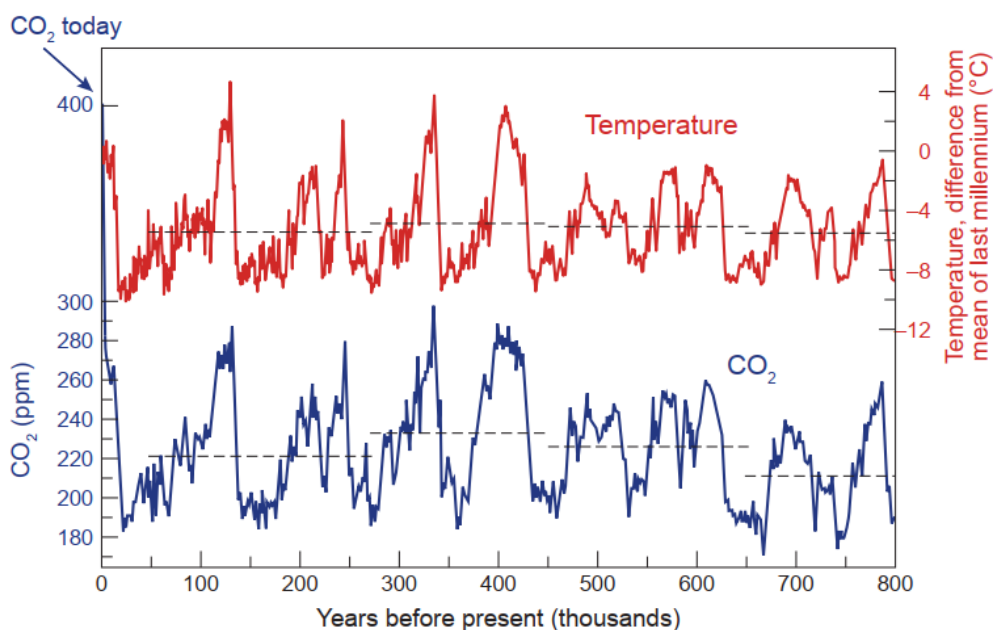


Figure 11: Évolution de la température et des concentrations du CO₂ et du méthane au cours des 650 000 dernières années (Mathez & Smerdon, 2018)

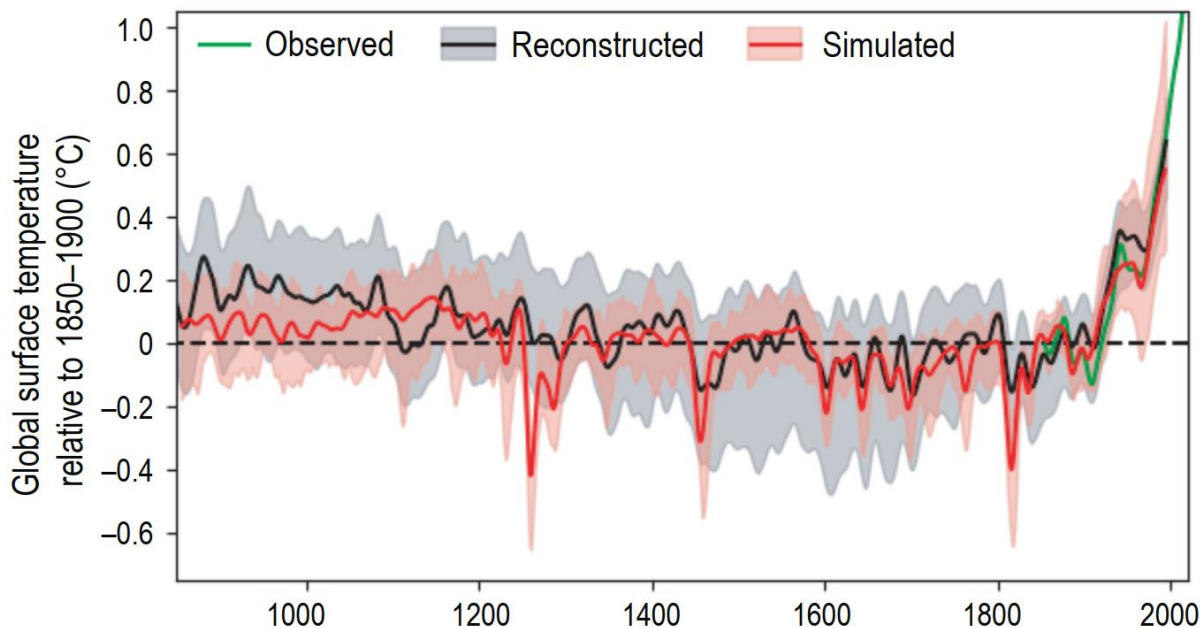


Figure 12: Comparaison des températures simulée, mesurée et reconstituée par rapport à celle de 1850-1900.

1.4.2.1 Indicateurs du changement climatique

Le principal indicateur du réchauffement climatique est l'augmentation de la température moyenne de l'air à la surface du globe. Grâce à des milliers de stations de mesure à travers le monde, une augmentation de température de 1,0°C depuis 1900 a été constatée (Arbogast, 2014). La Figure 13 représente quant à elle les anomalies de température observées depuis 1880 qui corroborent cette dernière constatation.

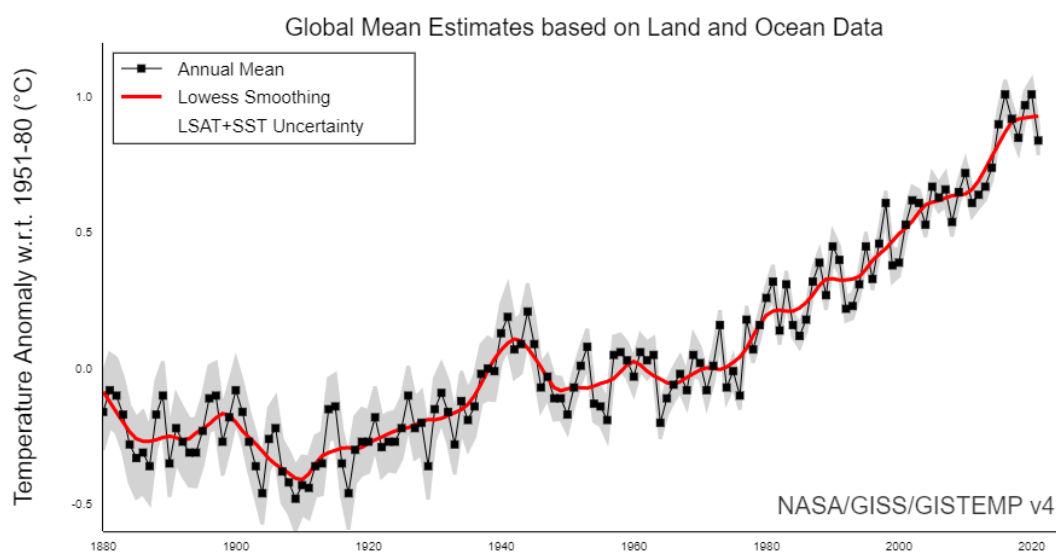


Figure 13: Anomalies de la température à la surface du globe, par rapport à la moyenne de 1951-1980, depuis 1880 (NASA, 2024)

D'autres types de mesures de la température atmosphérique et des niveaux de gaz à effet de serre dans le passé peuvent être utilisés tels les carottes de glace, l'étude des cernes des arbres (dendrochronologie), l'analyse des dépôts naturels de sédiments au fond des lacs, l'étude géologique et stratigraphique, l'analyse isotopique de l'oxygène des coraux, la documentation ancienne concernant différents phénomènes naturels comme les sécheresses, les inondations, la pluie, la neige, le rendement des cultures, les dates de gel des lacs et de floraison des arbres, etc. (Ahrens & Henson, 2019). Ces mesures permettent de comparer la tendance d'évolution passée de la température et du taux de gaz à effet de serre dans l'atmosphère sur des milliers d'années.

Outre la température moyenne de l'air à la surface du globe, d'autres indicateurs peuvent témoigner du changement climatique. Entre autres, la fonte de la cryosphère (glaciers, banquises, calottes polaires, étendues de glace, etc.), en particulier la banquise de l'arctique (Figure 14). Un autre indicateur est celui de l'étendue de la couverture neigeuse printanière dans l'hémisphère nord (Figure 15). De plus, l'élévation de la température moyenne des océans (Figure 16) et la montée du niveau de la mer sont également des éléments à prendre en considération (Figure 17).

S'ajoutent à cela d'autres phénomènes tels que des changements dans le régime des précipitations, des périodes de sécheresse, une augmentation du nombre et de l'étendue des incendies de forêt, ainsi qu'une intensification des ouragans.

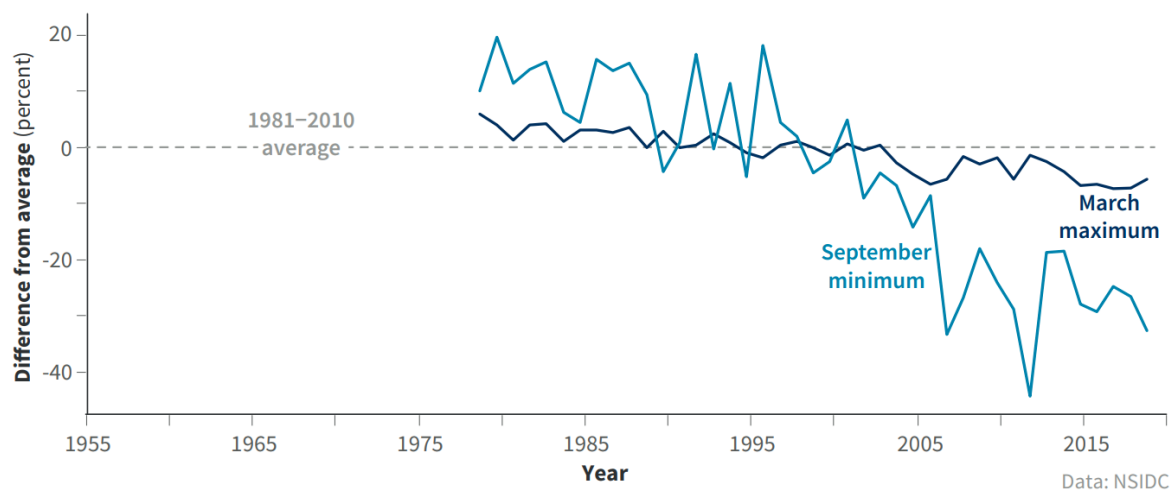


Figure 14: Étendue de la glace de l'océan arctique en hiver et en été (1979–2019) (Wolff et al., 2020)

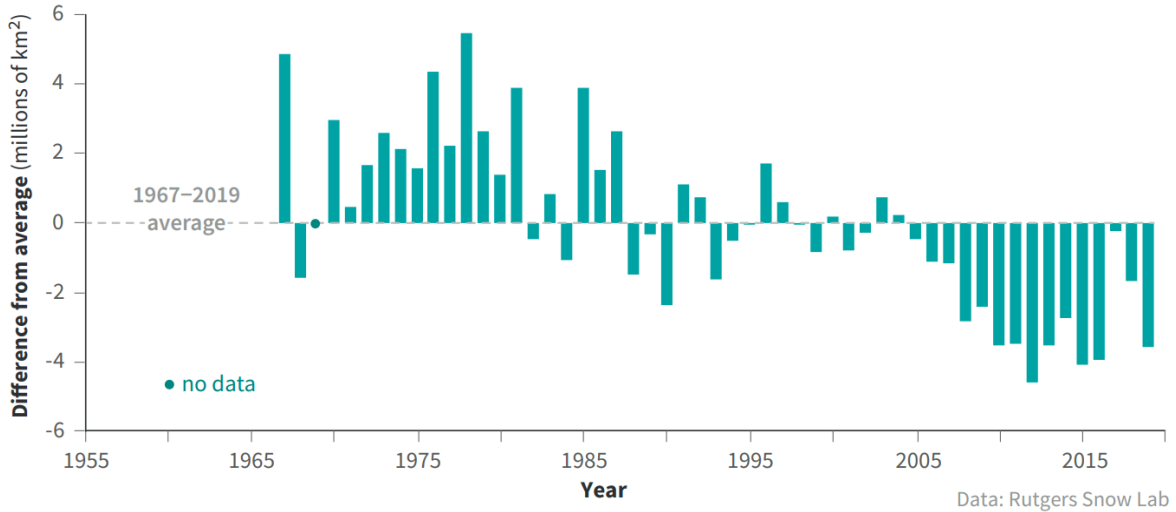


Figure 15: Couverture neigeuse de l'hémisphère nord en juin (1979–2019) (Wolff et al., 2020)

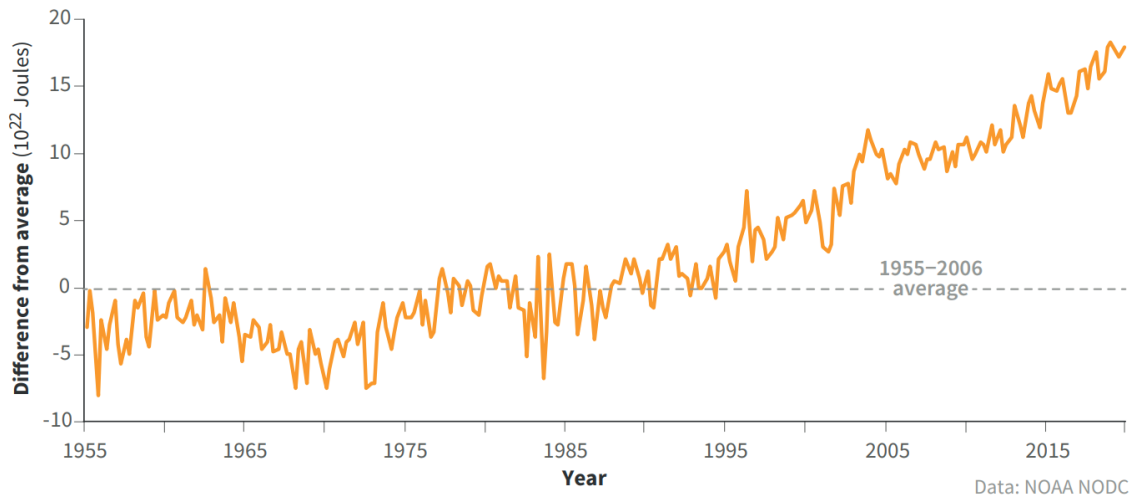


Figure 16: Contenu thermique de l'océan supérieur (1979–2019) (Wolff et al., 2020)

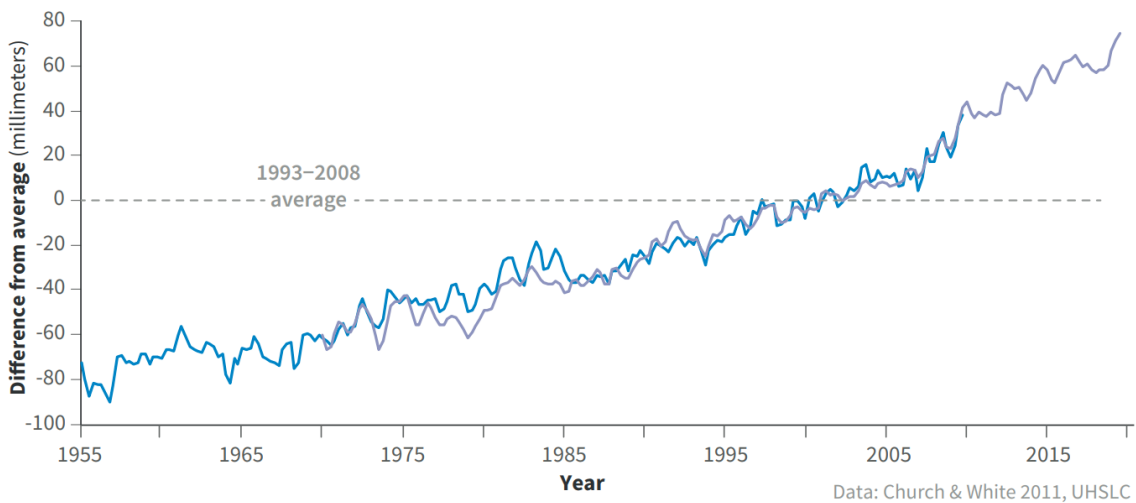


Figure 17: Niveau global des mers (1955-2019) (Wolff et al., 2020)

1.4.2.2 Les impacts du changement climatique

Le changement climatique cause la perturbation de plusieurs phénomènes naturels en atténuant ou en amplifiant leurs fréquences et leurs intensités.

La Figure 18 résume les différentes interactions climatiques et les différents impacts qui en découlent.

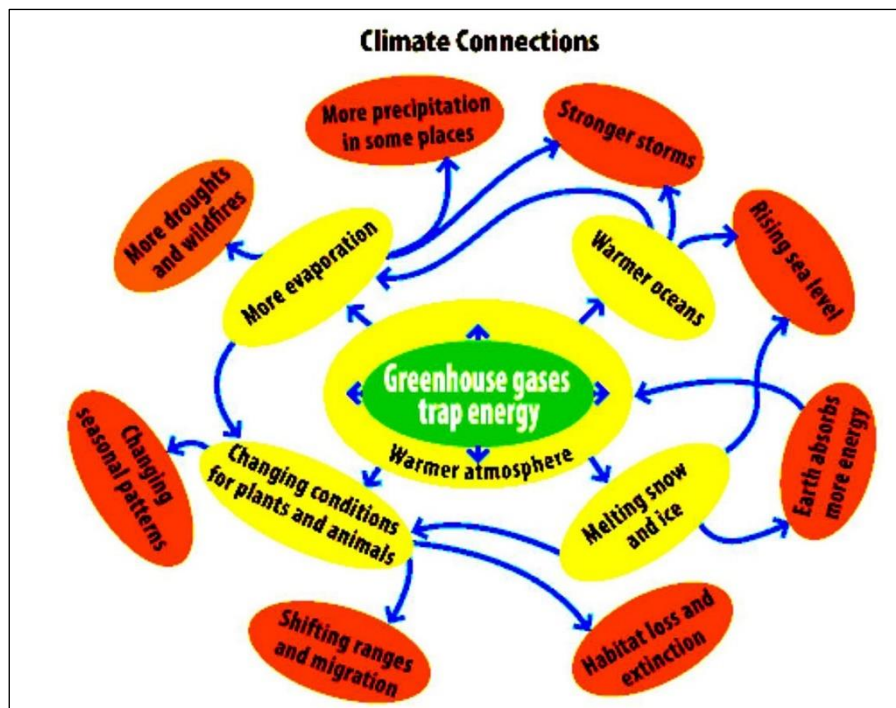


Figure 18: Interactions et impacts climatiques (Shafer, 2017)

Parmi les conséquences du changement climatique on peut citer :

- **La fonte des glaces et la hausse du niveau de la mer**

L'élévation du niveau de la mer, ayant augmenté d'environ 21 à 24 cm au niveau mondial depuis 1880 (NOAA Climate.gov, 2022), peut être attribué principalement à deux facteurs. En premier lieu, l'expansion thermique des océans provoquée par l'élévation de leur température conduit à une augmentation de leur volume. De plus, la fonte des glaciers due au réchauffement global (Figure 19) apporte une contribution substantielle à l'élévation du niveau de l'eau dans les océans. Les projections indiquent qu'une fonte complète des glaciers de l'Arctique et de l'Antarctique pourrait induire respectivement à des hausses du niveau marin de 7 et 60 mètres (National Research Council, 2010). Cette tendance à l'augmentation du niveau de la mer est susceptible de se poursuivre dans les années à venir. Le sixième rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat anticipe une élévation du niveau marin allant de 0,28 à 1,88 mètre d'ici 2100, en fonction du scénario envisagé (IPCC, 2021).

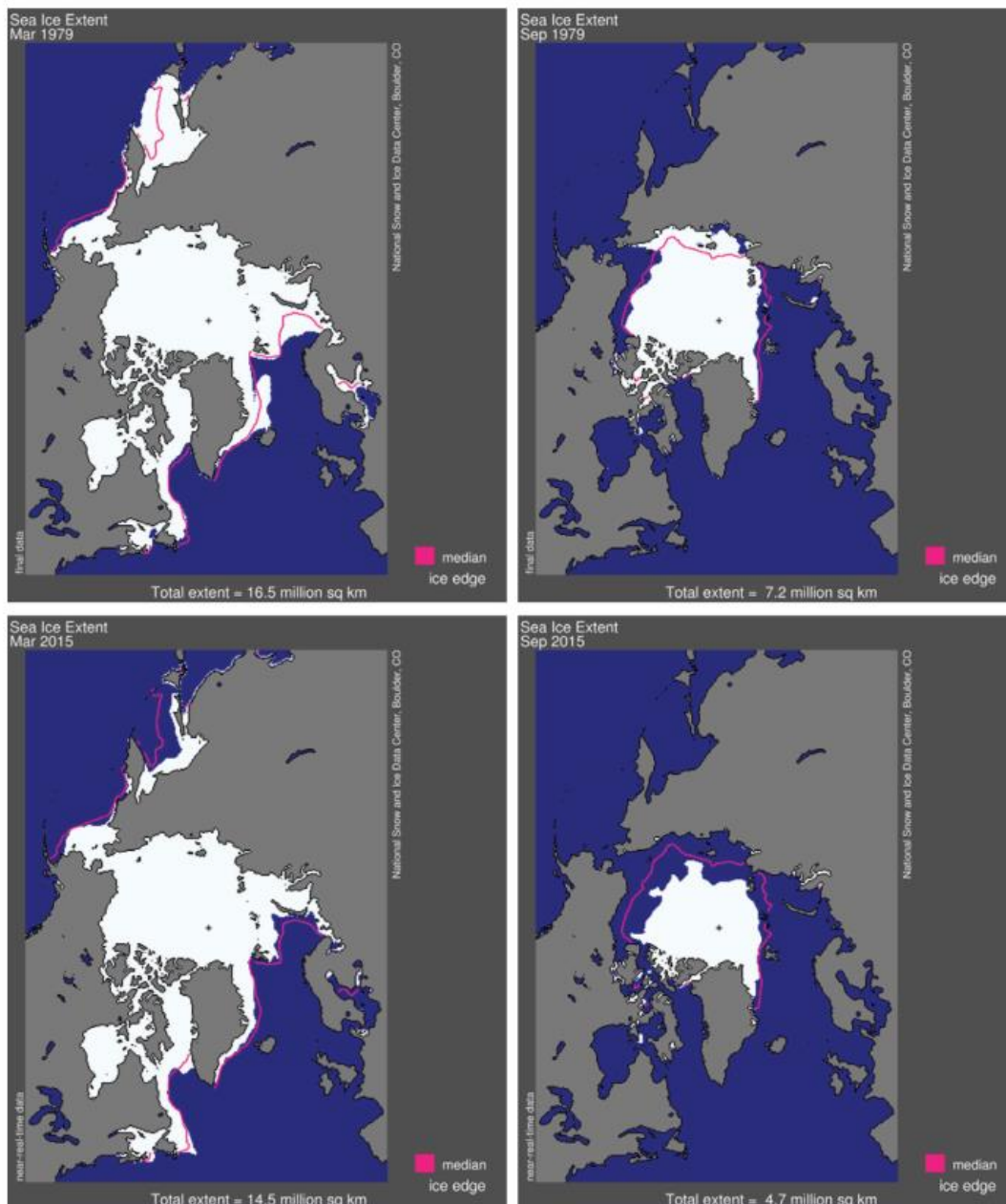


Figure 19: La diminution de la superficie de la couverture de glace de l'océan Arctique entre 1979-2015 (Mathez & Smerdon, 2018)

- **Précipitations et tempêtes**

Le réchauffement global de la planète entraîne un réchauffement des océans, ce qui favorise une augmentation de l'évaporation. L'air chargé en vapeur d'eau résultant de cette évaporation entraîne des précipitations et des épisodes pluvieux plus intenses. De plus, une atmosphère plus chaude peut contenir plus de vapeur d'eau, environ 7% de plus par degrés Celsius de réchauffement (IPCC, 2021; Romm, 2016). Cette vapeur d'eau une fois condensée dans les nuages va provoquer des précipitations plus intenses que la normale. Si ces nuages contenant d'importantes quantités d'eau déclenchent des ouragans ou des cyclones, ces derniers seront logiquement plus puissants. Parallèlement à cela, le réchauffement climatique induit une

diminution des précipitations dans certaines régions de la planète, et pourrait aussi modifier le calendrier saisonnier des précipitations (Mathez & Smerdon, 2018).

- **Sécheresses et vague de chaleurs**

Le réchauffement global de la planète induit une élévation de la température moyenne terrestre, ce qui perturbe notablement le schéma de distribution des précipitations. Cette perturbation entraîne de manière évidente des périodes de sécheresse dans de vastes régions du globe, qui tendront à être encore plus sévères dans les régions qui en souffrent déjà. Parallèlement, les événements de vagues de chaleur, qui sont des phénomènes extrêmes par rapport aux conditions normales, deviennent plus intenses et plus fréquents. De plus, ces vagues de chaleur ont tendance à persister sur de plus longues périodes et à s'étendre sur des zones géographiques plus vastes. En effet, les chercheurs estiment que les occurrences des vagues de chaleur les plus extrêmes ont été multipliées par 50 en comparaison avec la période de référence 1951-1980 (Romm, 2016).

En somme, les sécheresses et les vagues de chaleur touchent un nombre croissant de régions à travers le monde et présentent une intensité accrue ainsi qu'une fréquence renforcée dans les zones déjà exposées à ces phénomènes.

- **Les feux de forêts**

Les conditions propices à l'intensification des feux de forêts sont amplifiées par les sécheresses plus sévères provoquées par le réchauffement planétaire, ainsi que par des températures plus élevées et une fonte prématurée de la neige, entraînant une diminution de la disponibilité en eau pour la fin de l'été et le début de l'automne. Ces facteurs réunis constituent un environnement favorable au déclenchement des incendies forestiers. Ces incendies dégagent d'importantes quantités de CO₂, ce qui, par un mécanisme de rétroaction, amplifie encore davantage le réchauffement climatique (Romm, 2016).

Les spécialistes estiment que les incendies extrêmes pourraient augmenter de 14 % d'ici à 2030, de 30 % d'ici à 2050 et de 50 % d'ici à la fin du siècle (ONU, 2022)⁶.

1.4.2.3 Historique des négociations internationales sur le climat

La présente section offre un aperçu de l'histoire des négociations climatiques (Figure 20).

La conférence des nations unies à Stockholm en 1972 a marqué le premier point de départ des négociations sur le climat. Elle a permis d'attirer l'attention sur la pollution et a abouti à la création du programme des nations unies pour l'environnement (PNUE). En 1979, la première Conférence mondiale sur le climat s'est tenue à Genève, mettant en évidence la corrélation entre les activités humaines et le changement climatique. S'ensuit la publication du Rapport de « Brundtland » définissant le développement durable en 1987.

⁶ <https://news.un.org/fr/story/2022/02/1114982> (consulté le 29/07/2022)

L'année 1988 marque une étape cruciale avec la création du Groupe d'experts intergouvernemental sur les changements climatiques (GIEC) également connu sous le nom d'« IPCC » (Intergovernmental Panel on Climate Change) en anglais. Placé sous l'égide du PNUE (Programme des Nations Unies pour l'Environnement) et de l'OMM, le GIEC est chargé du suivi de l'évolution des connaissances sur le changement climatique sur lequel il publie périodiquement des rapports de synthèse.

La publication du 1er rapport du GIEC fut en 1990, qui met en évidence des preuves indiquant une influence perceptible de l'impact des activités humaines sur le climat. Plus tard, la Convention-cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) a été adoptée en 1992 au sommet de la Terre de Rio. Cette convention, ratifiée par la majorité des pays, fixe comme objectif de « stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique ». Les pays signataires prévoient d'organiser des réunions périodiques pour discuter des démarches à entreprendre pour atteindre cet objectif (Figure 21). Ces réunions sont dénommées « Conférences des Parties (CdP) ». La première CdP s'est tenue à Berlin en 1995. La 3ème CdP a été marquée par la ratification du protocole de Kyoto, dont l'objectif était la réduction des pays signataires, à travers des mesures contraignantes, de 5,2% de leurs émissions de gaz à effet de serre entre 2008 et 2012 par rapport au niveau de 1990. Ce protocole est entré en vigueur en 2005 (MEAE, 2022)⁷. L'Algérie a ratifié ce protocole le jour de son entrée en vigueur.

L'accord de Paris sur le climat représente une étape majeure dans les discussions internationales sur le climat. Ratifié en 2015, cet accord établit l'objectif de limiter le réchauffement planétaire à 2 degrés Celsius, voire même de se rapprocher de l'objectif plus ambitieux de 1,5 degré Celsius par rapport à l'ère préindustrielle.

⁷ <https://www.diplomatie.gouv.fr/fr/politique-etrangere-de-la-france/climat-et-environnement/la-lutte-contre-les-changements-climatiques/les-negociations-internationales-en-matiere-de-lutte-contre-les-changements/article/chronologie-des-negociations-climat-de-1988-a-aujourd-hui> (consulté le 30/07/2022)

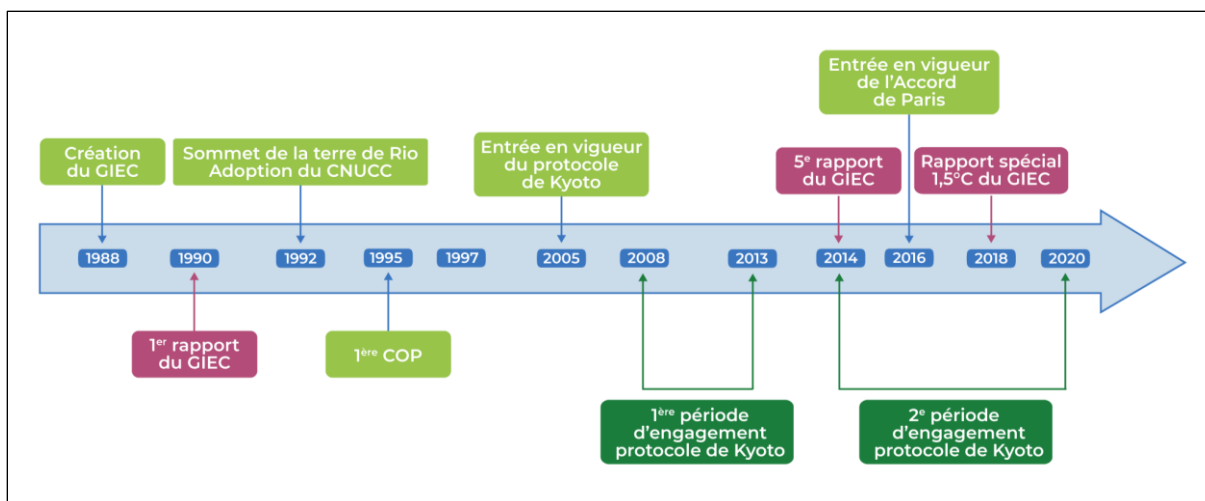


Figure 20: Événements politiques internationaux de lutte contre le changement climatique (Eaufrance, 2019)

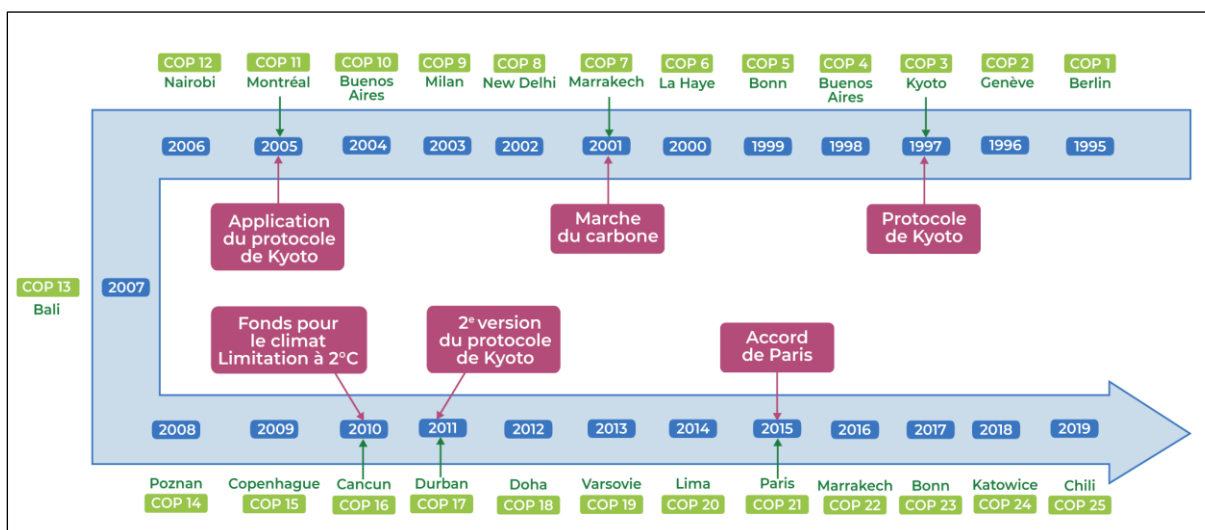


Figure 21: Les CdP et les principales actions qui en résultent (Eaufrance, 2019)

1.4.2.4 La relation entre réchauffement climatique et changement climatique

Le réchauffement climatique fait généralement référence au phénomène observé d'augmentation de la température moyenne à la surface de la Terre attribuable aux émissions de gaz à effet de serre d'origine humaine.

Le changement climatique quant à lui désigne généralement l'ensemble des différents changements, sur des périodes plus ou moins longues, des propriétés de notre système climatique, notamment la température, l'humidité, les précipitations, etc. Ces transformations induisent des perturbations dans les manifestations météorologiques, l'acidification des océans, l'élévation du niveau de la mer, ainsi que d'autres conséquences.

Au cours des dernières décennies, les termes "**changement climatique**" et "**réchauffement climatique**" sont devenus interchangeables dans l'usage général ou populaire (Romm, 2016).

1.4.3 Le changement climatique observé

1.4.3.1 *Le changement climatique observé à l'échelle globale*

Malgré des fluctuations, la température moyenne de l'air à la surface du globe est restée à peu près constante pendant la dernière partie du XIXe siècle jusqu'en 1910 environ, après quoi un réchauffement rapide s'est produit avec une accentuation particulièrement notable au cours des trois dernières décennies, comme illustré dans la Figure 22.

Globalement, la température moyenne de l'air à la surface du globe a augmenté d'environ 1,0°C entre 1880 et 2016 (Mathez & Smerdon, 2018).

Toutefois, cette hausse de température présente des disparités à l'échelle géographique, où les régions continentales connaissent un réchauffement plus rapide que les zones océaniques. De plus, ce réchauffement se manifeste de manière plus marquée aux latitudes élevées de l'hémisphère Nord (Figure 22 b).

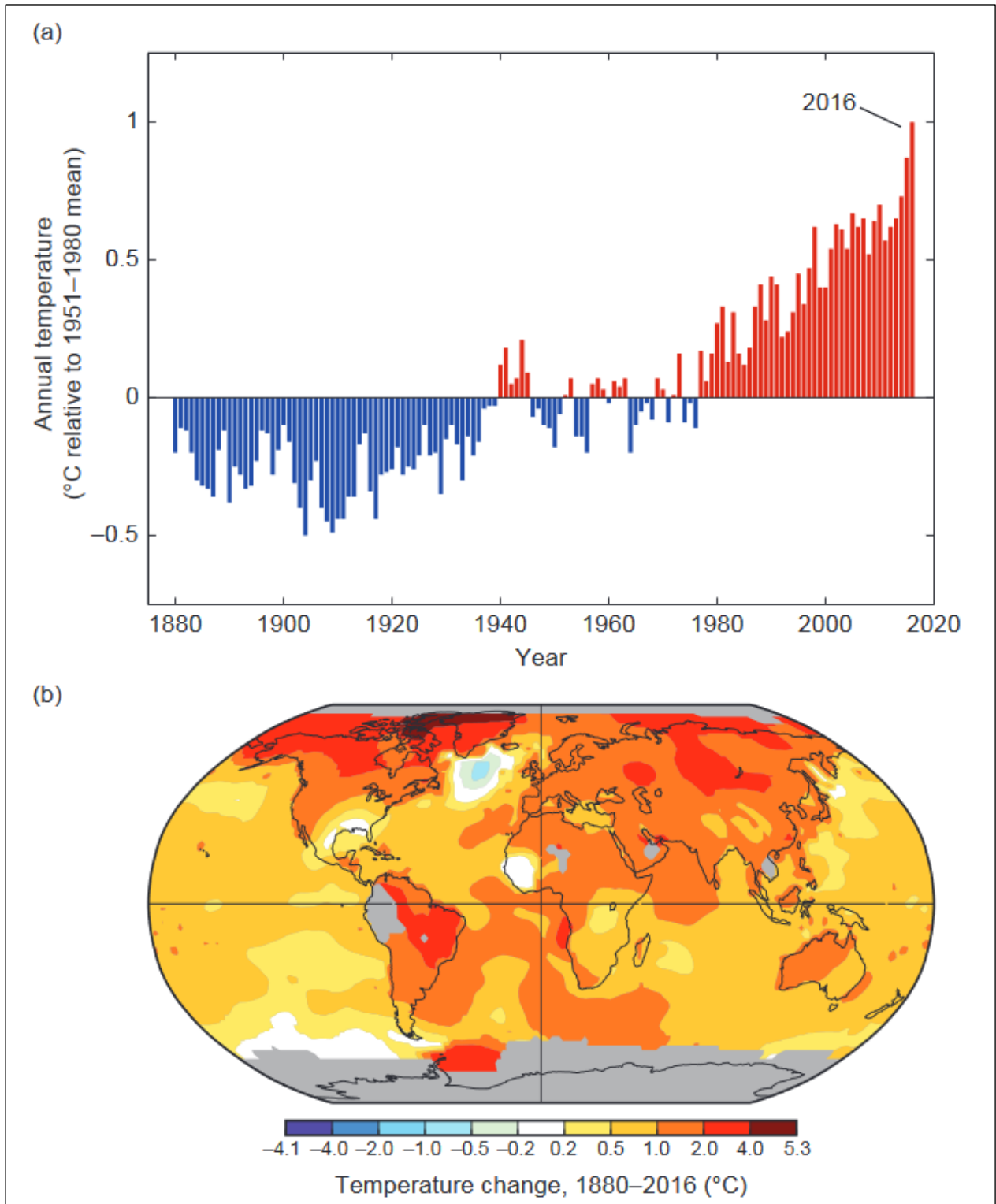


Figure 22: Changements observés dans la température moyenne de l'air à la surface du globe (a) et dans la répartition géographique de la température (b) (Mathez & Smerdon, 2018)

En raison de l'étroite interconnexion entre l'océan et l'atmosphère, la température des océans a connu une augmentation notable sur plusieurs décennies (Figure 23). Cette augmentation découle du couplage substantiel entre ces deux éléments clés du système climatique terrestre.

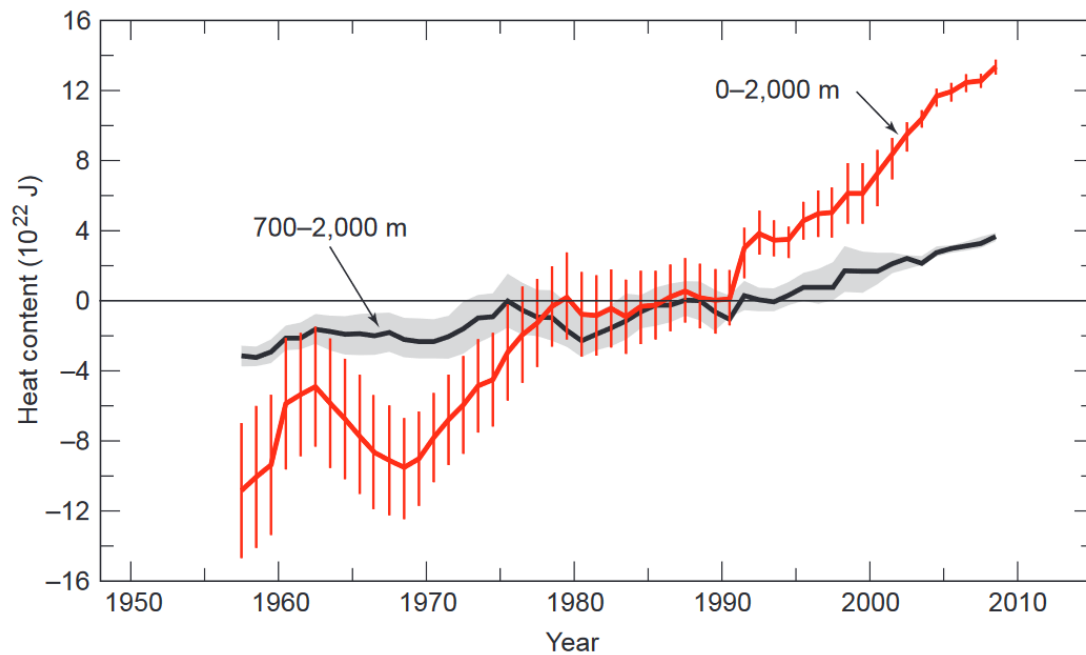


Figure 23: Le changement observé de la teneur en chaleur de l'océan mondial (Mathez & Smerdon, 2018)

En relation avec l'élévation de la température moyenne à la surface du globe, d'autres modifications notables du climat ont été observées au cours du 20^{ème} siècle, comme expliqué précédemment (voir section 1.4.2.2), citons :

- L'élévation des niveaux des mers avec une moyenne de 3,6 mm/an (NOAA Climate.gov, 2022) ;
- La réduction des zones couvertes de neige ou de glace ;
- La perturbation des régimes pluviométriques.

1.4.3.2 Le changement climatique observé dans la région méditerranéenne

La région méditerranéenne est considérée comme une zone climatique fragile et vulnérable, où de légères variations dans la circulation atmosphérique peuvent entraîner des changements climatiques significatifs. Par conséquent, cette région est l'une des plus sensibles au changement climatique, comme le confirment de nombreuses études (Thiébaud & Moatti, 2016; Giorgi & Lionello, 2008; UNEP/MAP & Plan Bleu, 2020).

Le changement climatique récent en Méditerranée dépasse les tendances mondiales pour un certain nombre de variables. Alors que la température moyenne à la surface du globe est aujourd'hui supérieure d'environ 1,0°C aux valeurs préindustrielles, la région méditerranéenne s'approche de 1,54°C (Figure 24 et Figure 25) (UNEP/MAP & Plan Bleu, 2020).

En Afrique du Nord, l'accroissement est encore plus marqué, atteignant près de 2,0°C. Pendant les décennies 1980 et 1990, l'élévation des températures s'est manifestée de manière plus accentuée dans la région du bassin méditerranéen, présentant une hausse plus significative pendant la saison hivernale, principalement en ce qui concerne les températures minimales (Collins, 2011; Nicholson, 2001).

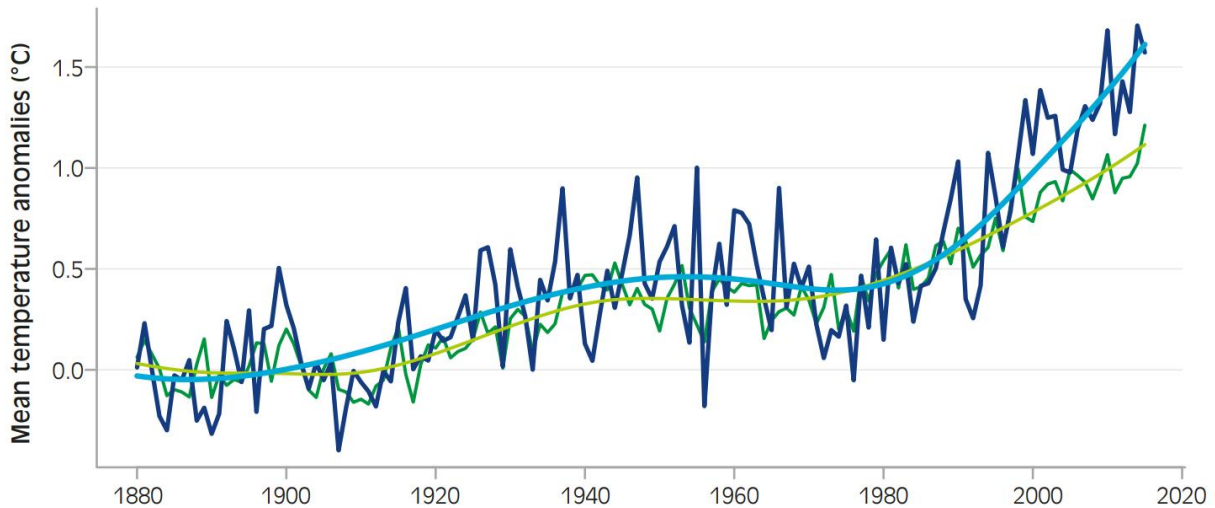


Figure 24: Réchauffement observé au niveau global (en vert) et dans le bassin méditerranéen (en bleu) (UNEP/MAP & Plan Bleu, 2020)

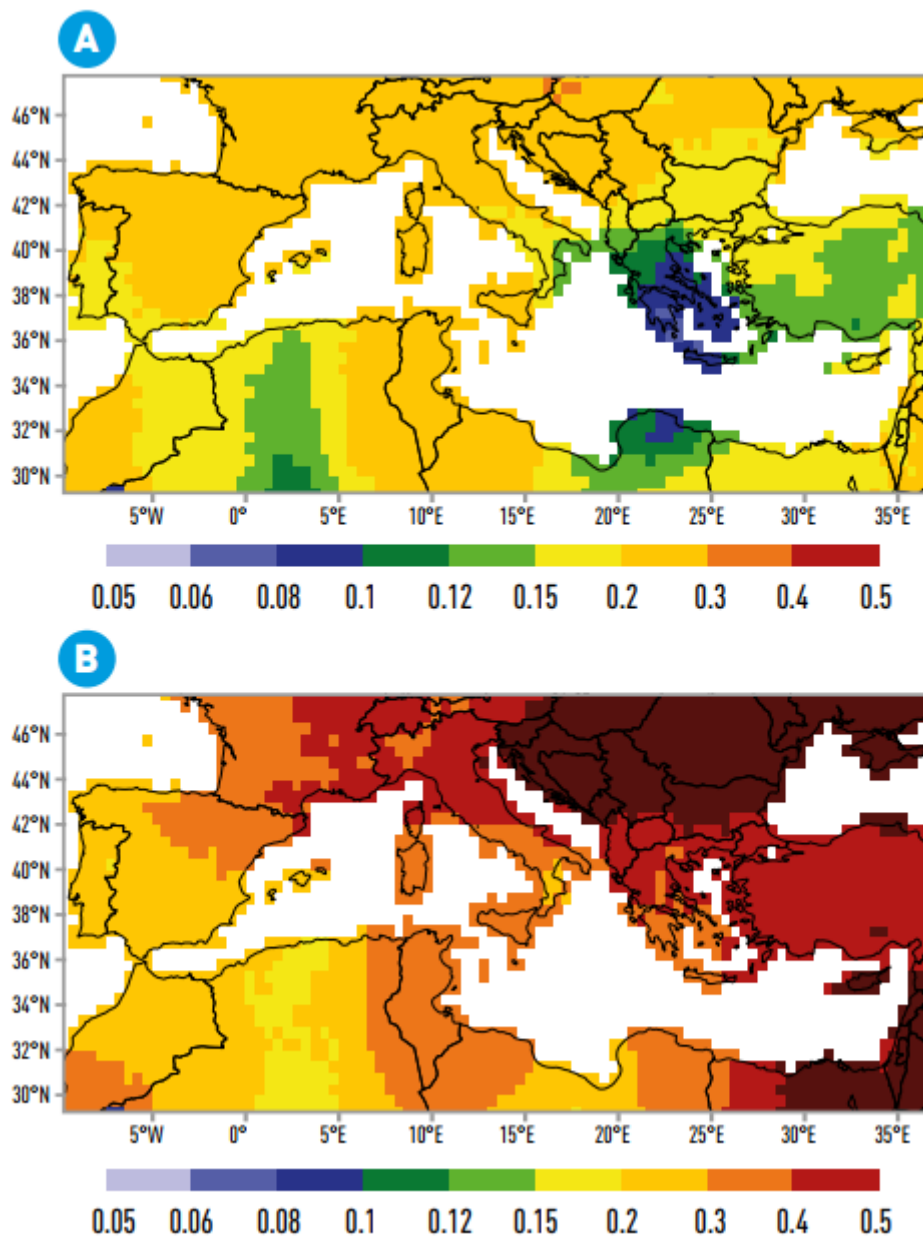


Figure 25: Réchauffement (°C/décennie) observé en Méditerranée au cours des périodes 1950-2018 (A) et 1980-2018 (B) (MedECC, 2020)

D'autre part, les précipitations observées varient très fortement d'une année à l'autre et entre les régions et il n'est donc pas possible de supposer une réduction des précipitations sur l'ensemble de la Méditerranée. Cependant, la fréquence et l'intensité des sécheresses ont augmenté depuis 1950 (Kelley et al., 2015; Vicente-Serrano et al., 2014). Les épisodes de fortes précipitations ont également changé de manière significative au cours de la période 1991-2010 par rapport à la période 1960-1979 (Schleussner et al., 2018).

Les précipitations ont décliné avec une diminution d'environ 20% dans certaines zones (Alpert et al., 2008; Cislighi et al., 2005) (Figure 26). En ce qui concerne l'Afrique du Nord, la tendance est plus complexe (Born et al., 2008).

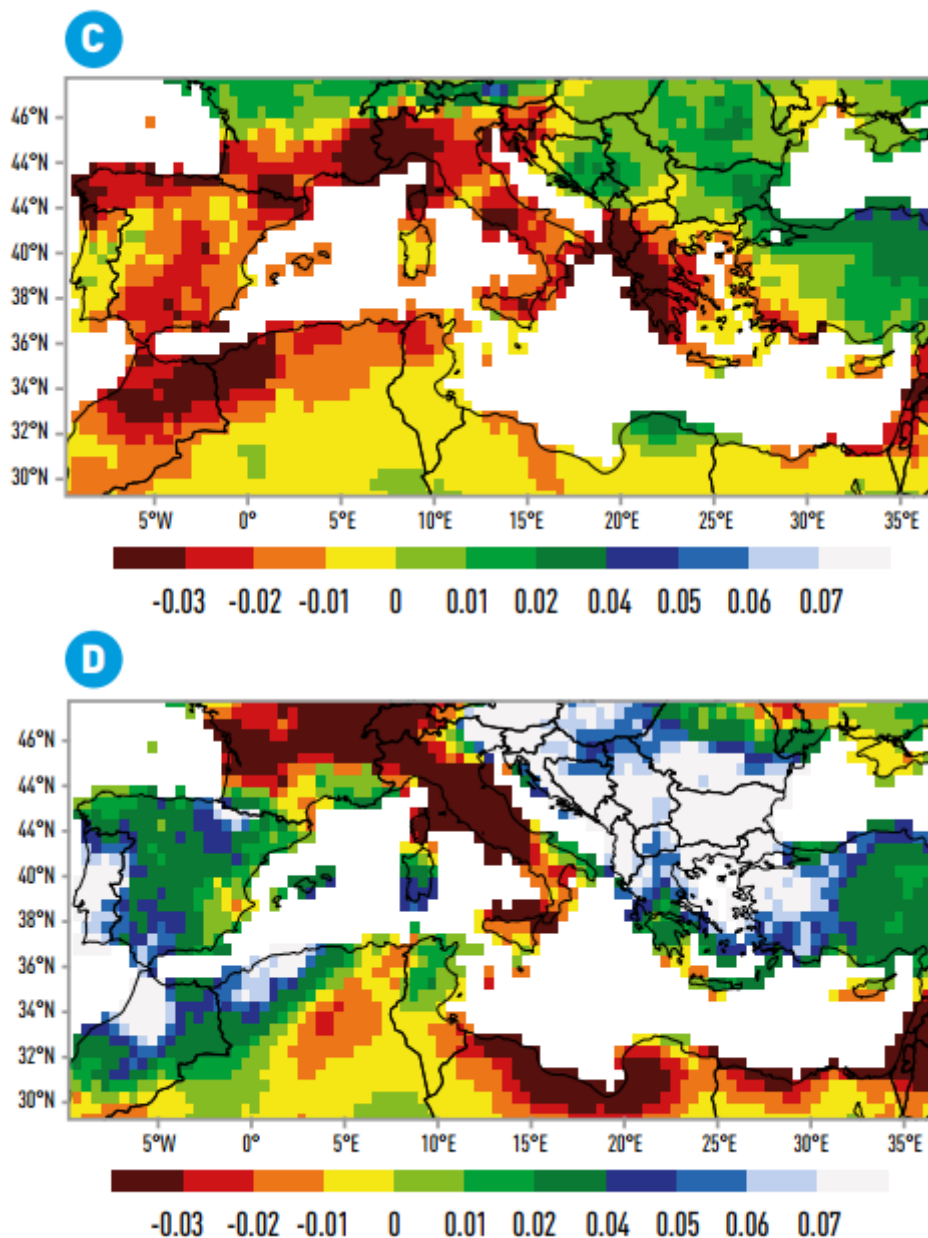


Figure 26: Changements observés des précipitations dans le bassin méditerranéen 1950-2018 (C) et 1980-2018 (D) (mm/jour/décennie) (MedECC, 2020)

1.4.3.3 Le changement climatique observé en Algérie

- **Les différents climats de l'Algérie**

L'Algérie est un vaste pays avec une superficie d'environ 2 381 741 Km², situé dans la zone subtropicale au Sud de la méditerranée entre les latitudes 18° et 38° Nord et les longitudes 9° et 12° Est. L'Algérie est ainsi caractérisée par une diversité de climats.

Son territoire peut être divisé en trois zones climatiques principales (DGE, 2001) :

- La zone tellienne au Nord, donnant sur la Méditerranée et ne représentant que 4 % du territoire algérien. Elle abrite l'essentiel des terres fertiles du pays. Cette zone est caractérisée par le climat méditerranéen, doux en hiver et sec en été.
- Les hauts plateaux et la Steppe : d'une altitude moyenne de 900m, les hauts plateaux et la Steppe constituent 9 % du territoire et sont délimités principalement par les chaînes montagneuses de l'Atlas tellien au Nord et l'Atlas saharien au Sud. Cette région se distingue par un climat semi-aride, caractérisé par une réduction de l'humidité et un accroissement de l'insolation.
- Le Sahara, marqué par un ensoleillement important et une faible pluviométrie ce qui lui confère un climat désertique. Le Sahara occupe l'essentiel de la superficie de l'Algérie avec près de 87% du territoire.

Par ailleurs, un zonage climatique plus détaillé est disponible, notamment à travers la classification de Köppen-Geiger (Beck et al., 2018), comme illustré dans les Figures 27 et Figure 28 et dans le Tableau 2.

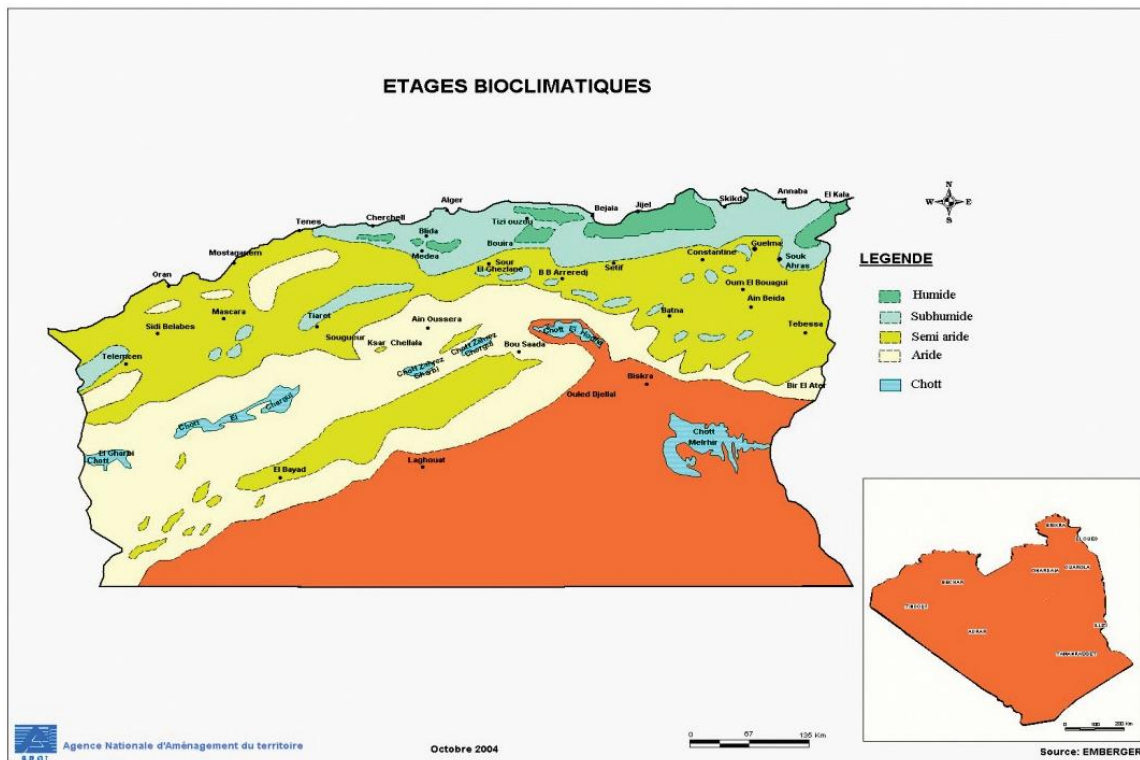


Figure 27: Étages bioclimatiques de l'Algérie (MATE, 2010)

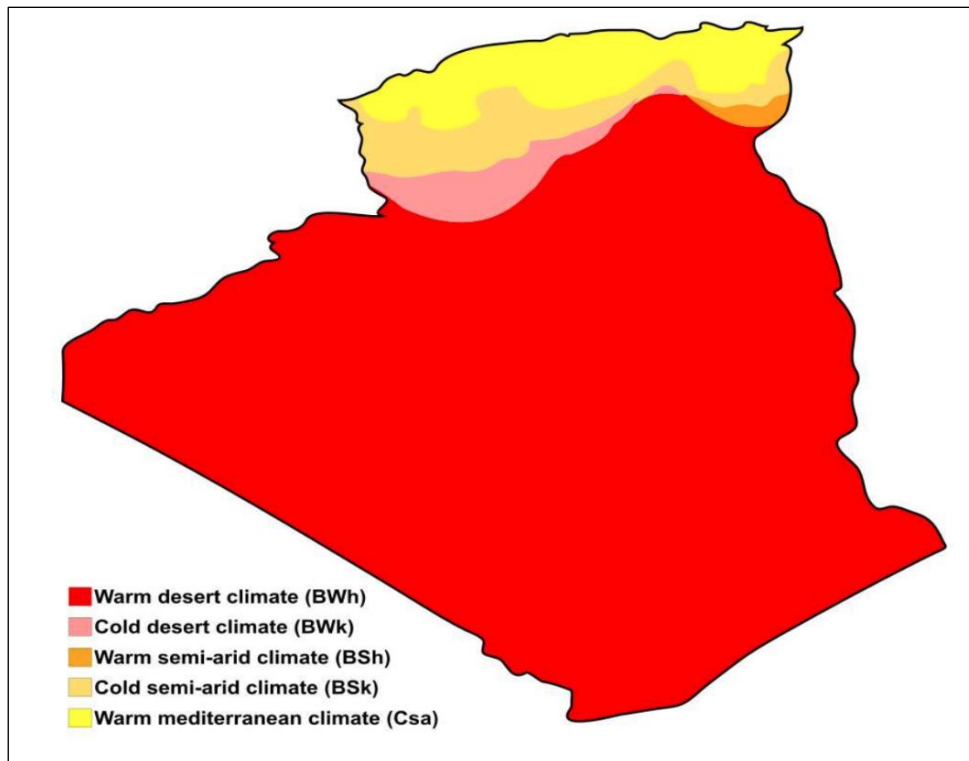


Figure 28: Climats de l'Algérie selon la classification de Köppen-Geiger (Beck et al., 2018)

Tableau 2: Codification de la classification de Köppen-Geiger (Beck et al., 2018)

1st	2nd	3rd	Description	Criterion ^a
A			Tropical	Not (B) & $T_{cold} \geq 18$
	f		- Rainforest	$P_{dry} \geq 60$
	m		- Monsoon	Not (Af) & $P_{dry} \geq 100-MAP/25$
	w		- Savannah	Not (Af) & $P_{dry} < 100-MAP/25$
B			Arid	$MAP < 10 \times P_{threshold}$
	W		- Desert	$MAP < 5 \times P_{threshold}$
	S		- Steppe	$MAP \geq 5 \times P_{threshold}$
		h	- Hot	$MAT \geq 18$
		k	- Cold	$MAT < 18$
C			Temperate	Not (B) & $T_{hot} > 10$ & $0 < T_{cold} < 18$
	s		- Dry summer	$P_{dry} < 40$ & $P_{dry} < P_{wvet}/3$
	w		- Dry winter	$P_{wdry} < P_{wvet}/10$
	f		- Without dry season	Not (Cs) or (Cw)
		a	- Hot summer	$T_{hot} \geq 22$
		b	- Warm summer	Not (a) & $T_{mon10} \geq 4$
		c	- Cold summer	Not (a or b) & $1 \leq T_{mon10} < 4$
D			Cold	Not (B) & $T_{hot} > 10$ & $T_{cold} \leq 0$
	s		- Dry summer	$P_{dry} < 40$ & $P_{dry} < P_{wvet}/3$
	w		- Dry winter	$P_{wdry} < P_{wvet}/10$
	f		- Without dry season	Not (Ds) or (Dw)
		a	- Hot summer	$T_{hot} \geq 22$
		b	- Warm summer	Not (a) & $T_{mon10} \geq 4$
		c	- Cold summer	Not (a, b, or d)
		d	- Very cold winter	Not (a or b) & $T_{cold} < -38$
E			Polar	Not (B) & $T_{hot} \leq 10$
	T		- Tundra	$T_{hot} > 0$
	F		- Frost	$T_{hot} \leq 0$

La géographie distincte de l'Algérie, caractérisée par des zones géographiques contrastées, ainsi que son exposition aux influences simultanées des systèmes climatiques tempérés et tropicaux, la rendent particulièrement vulnérable aux effets du changement climatique mondial.

▪ **Les principaux changements observés**

Au cours du 20ème siècle, le climat a manifesté des variations, et les signaux du changement climatique se manifestent à travers les interruptions observées dans les séries chronologiques des précipitations. Les projections climatiques pour le siècle en cours mettent en évidence un risque potentiel de réduction des précipitations pouvant atteindre jusqu'à 20% (DGE, 2001 ; Giorgi et Lionello, 2008).

Depuis l'année 1970, on observe une tendance à la hausse des températures moyennes minimales et maximales à l'échelle nationale, et cette tendance se maintient. Au cours des vingt dernières années, les températures maximales connaissent une augmentation plus prononcée

que les températures minimales, entraînant une élévation d'environ 2°C de la température globale. Cette augmentation des températures a un impact évident sur la réduction du nombre de jours de neige. Dans certaines régions, on note un déclin de 26 jours annuel en moyenne pendant la période 1971-1980 à seulement 6 jours durant la période 1981-1990.

La Figure 29 présente, à titre d'exemple, les données de la station d'Oran pour la période 1926 à 2006, révélant une élévation de la température située dans une fourchette allant de 0,65 à 1,45 °C (Tabet-Aoul, 2008).

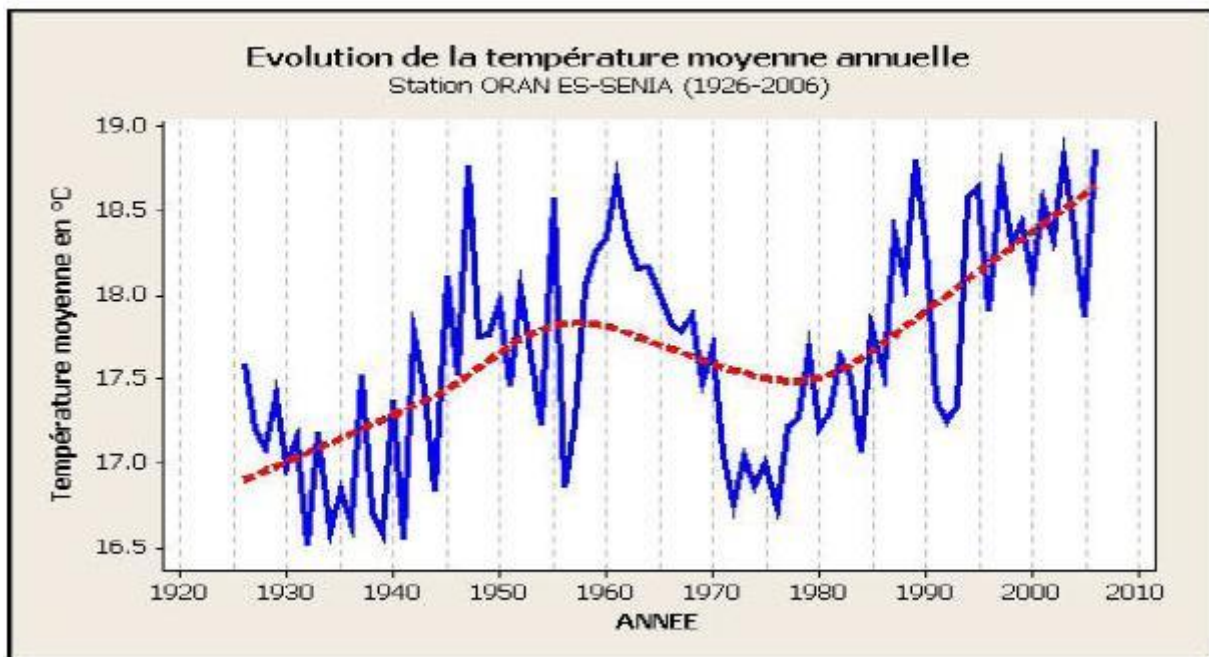


Figure 29: Évolution de la température moyenne annuelle à Oran (1926- 2006) (Tabet-Aoul, 2008)

Les périodes les plus marquées par des conditions de sécheresse ont été identifiées durant les années 1949 à 1956 et en 1960. À partir de 1974, l'analyse de l'évolution des schémas de précipitations met en évidence une réduction d'environ 13% dans la région Est, 13,6% dans la région Centrale et 16,1% dans la région Ouest. Depuis l'an 2000, un déficit pluviométrique persistant est constaté dans l'ensemble des zones géographiques concernées.

Les occurrences de précipitations sont principalement observées durant la période s'étalant d'octobre à avril, et les épisodes pluvieux tendent à se regrouper sur des courtes périodes de quelques jours voire quelques heures. Les températures affichent une tendance à la hausse, ce qui induit une évapotranspiration significative.

La Figure 30 illustre les déplacements en direction nord des isohyètes 100 et 300 mm. Cette évolution se pose comme un indicateur tangible de la modification climatique en cours en Algérie. L'analyse des isohyètes 100 et 300 mm démontre, en effet, que ces déplacements vers le Nord peuvent s'étendre sur des distances excédant les 100 km.

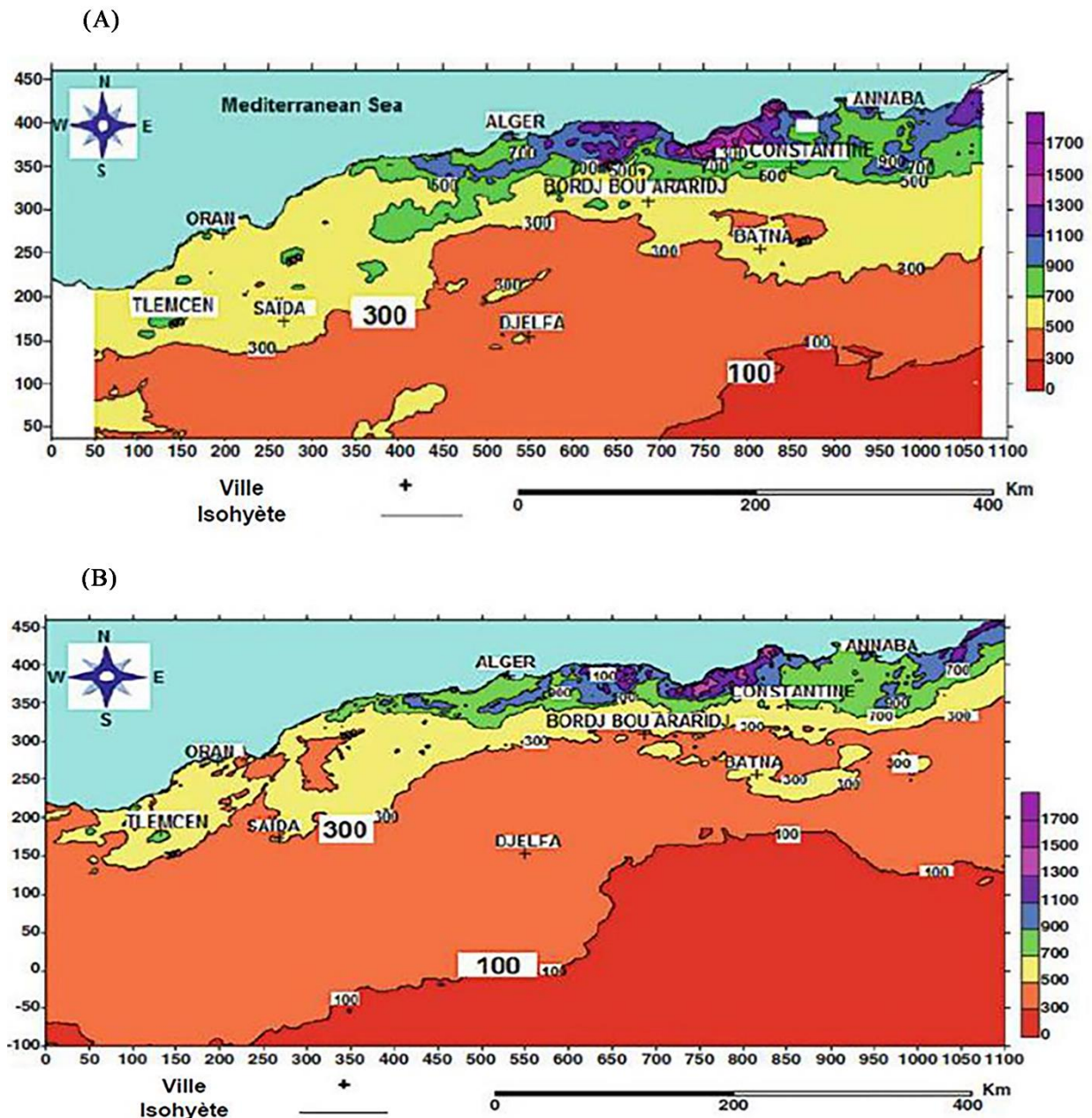


Figure 30: Carte pluviométrique selon l'ANRH pour les périodes 1922-1989 (A) et 1965-2004 (B) (Elmeddahi, 2016)

1.4.4 Approches de lutte contre le changement climatique

1.4.4.1 Atténuation et adaptation

Il existe deux grandes stratégies pour faire face aux changements climatiques : l'atténuation et l'adaptation (Dodoo & Gustavsson, 2016; Waddicor et al., 2016). La Figure 31 illustre la dynamique interconnectée des mécanismes de l'effet de serre, du changement climatique ainsi que de leurs impacts, en lien avec les stratégies de réponse. Parallèlement, la Figure 32 présente la corrélation entre les efforts d'adaptation et d'atténuation des changements climatiques.

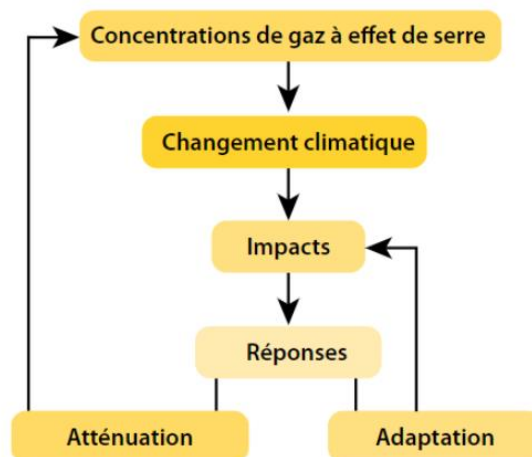


Figure 31: Stratégies de réponse au changement climatique (Locatelli, 2011)

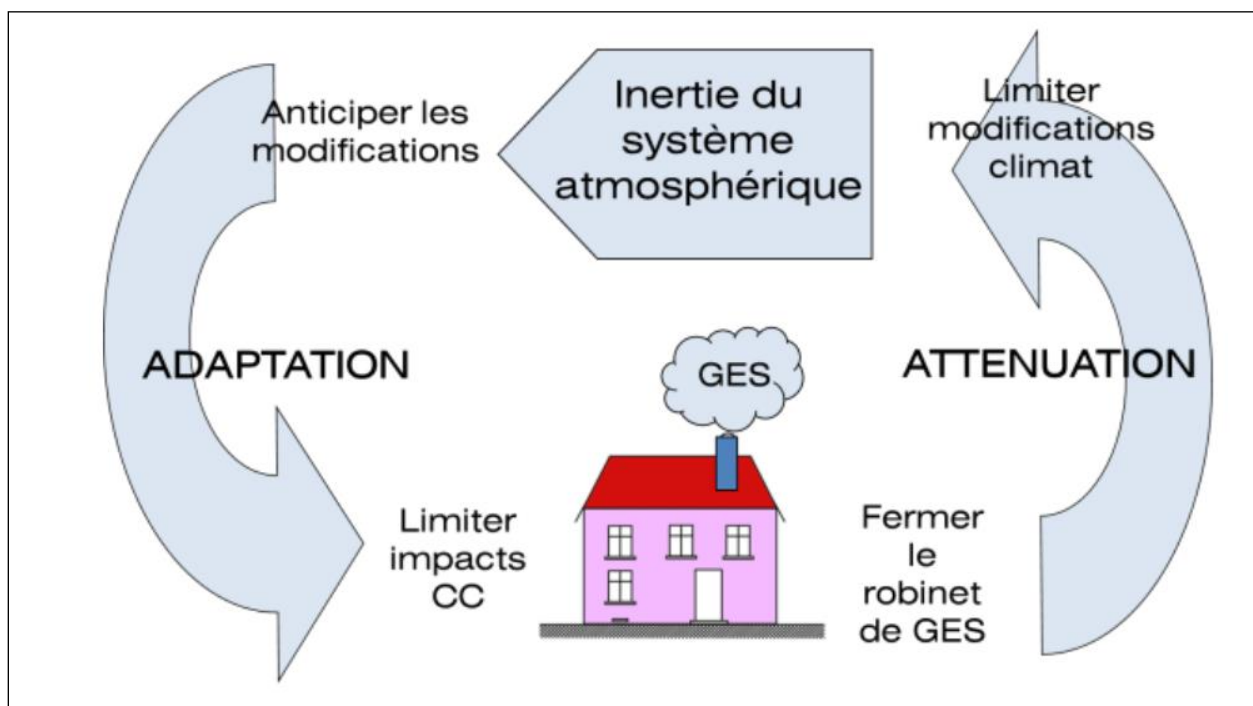


Figure 32: Relation entre l'adaptation et l'atténuation du changement climatique (Salagnac, 2015).

L'atténuation traite les causes du changement climatique en réduisant les émissions de gaz à effet de serre. L'adaptation, en revanche, aborde l'impact des changements climatiques tels que l'augmentation des températures, l'accroissement des tempêtes, les sécheresses, etc., en réduisant la vulnérabilité sociale et environnementale aux conséquences de ces changements observés ou prévus (Charron, 2016).

L'atténuation s'avère indispensable pour réduire l'ampleur des altérations du système climatique, car il demeure complexe de s'adapter adéquatement à des conditions extrêmes, même en employant des méthodes d'adaptation robustes. Toutefois, malgré les efforts

d'atténuation, il est anticipé que les températures continueront de croître à l'avenir. Par conséquent, l'adaptation au changement climatique est donc tout aussi essentielle.

L'adaptation et l'atténuation interviennent sur des échelles temporelles et spatiales différentes. En effet, les répercussions de l'adaptation au changement climatique sont observables à court et moyens termes et sur une échelle spatiale locale ; alors que l'atténuation a des répercussions sur le long terme et sur une échelle spatiale globale (Tableau 3) (Locatelli, 2011).




Tableau 3: Différences entre atténuation et adaptation au changement climatique (Locatelli, 2011)

	Atténuation	Adaptation
Échelle spatiale	Essentiellement un problème global, car l'atténuation présente des avantages globaux	Un problème essentiellement local, car l'adaptation apporte surtout des solutions locales.
Échelle temporelle	Un impact à long terme du fait de l'inertie du système climatique.	L'adaptation permet de réduire la vulnérabilité à court et moyen termes.
Secteurs	L'atténuation est primordiale dans les secteurs de l'énergie, des transports, de l'industrie et de la gestion des déchets.	L'adaptation est primordiale dans les secteurs de l'eau, de la santé et dans les zones littorales.
	L'atténuation et l'adaptation sont importantes pour les secteurs de la construction, de l'agriculture et de la foresterie.	

1.4.4.2 Les co-bénéfices de l'atténuation et de l'adaptation

L'atténuation et l'adaptation au changement climatique sont deux composantes essentielles de la réponse mondiale à ce défi planétaire. Bien que ces deux approches visent à réduire les impacts du changement climatique, elles sont souvent présentées comme des éléments distincts de la stratégie globale. Cependant, il est de plus en plus reconnu que l'atténuation et l'adaptation ne sont pas mutuellement exclusives, et sont plutôt complémentaires et leur conjugaison est essentielle pour optimiser la réponse au changement climatique. Ainsi, ces deux approches présentent des co-bénéfice, particulièrement pour certains secteurs comme décrit dans le Tableau 4.

Tableau 4: Exemples de co-bénéfices d’actions d’adaptation et d’atténuation

Actions d’Adaptation	Actions d’Atténuation
<ul style="list-style-type: none"> • Réduire la vulnérabilité aux inondations par des actions de reforestation/boisement • Lutter contre les îlots de chaleur urbains par des actions de verdissement urbain 	 <p>Augmenter les puits de carbone (absorption des GES) par des actions de reforestation et de verdissement urbain</p>
<p>Réduire la vulnérabilité aux risques sanitaires dus à la pollution des eaux usées et à la rupture de collecte des déchets ménagers durant les épisodes d’inondations par l’amélioration du système de gestion des déchets solides et liquides</p>	 <p>Réduire les émissions de GES par l’amélioration du système de gestion des déchets solides et liquides</p>
<p>Réduire la vulnérabilité des habitants et des utilisateurs des bâtiments résidentiels et tertiaires aux risques sanitaires dus aux périodes de canicule par des actions de renovation thermique et énergétique des bâtiments résidentiels et tertiaires</p>	 <p>Réduire les émissions de GES par des actions de renovation thermique et énergétique des bâtiments résidentiels et tertiaires :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mesures d’efficacité énergétique • Mesures d’intégration des énergies renouvelables

1.5 La modélisation climatique

1.4.1 Principes fondamentaux et mise en œuvre des modèles climatiques

Les outils les plus couramment utilisés pour élaborer des scénarios sur les changements climatiques et l’évaluation de leur impact sont les modèles climatiques globaux. (Giorgi & Mearns, 1991; Hulme & Viner, 1998; Semenov & Barrow, 1997.

Un modèle climatique se traduit par un programme informatique complexe qui se base sur des équations mathématiques qui représentent les connaissances les plus avancées des lois fondamentales de la physique (telles que la mécanique des fluides, la conservation de mouvement, la masse, la thermodynamique), de la chimie et de la biologie, qui régissent le

comportement des composantes du système climatique (l'hydrosphère, la cryosphère, la lithosphère, la biosphère) et leurs interactions (Wolff et al., 2020).

Le comportement du système climatique est considéré comme chaotique, ce qui signifie qu'il est non-linéaire et complexe. En raison de la complexité des équations mathématiques nécessaires pour décrire ce système, une résolution analytique exacte demeure hors de portée. Ainsi, pour résoudre ces équations, il est impératif de recourir à des méthodes numériques avancées et à des superordinateurs performants.

Afin de réaliser une représentation numérique précise du système climatique, l'idéal serait de mener des calculs à chaque point de l'atmosphère et de la surface terrestre. Cependant, une telle approche demeure actuellement hors de portée en raison de sa complexité. Par conséquent, les scientifiques ont adopté une approche consistant à diviser virtuellement la surface terrestre en grilles tridimensionnelles, appelées "mailles". Chaque maille représente un volume défini d'air, de terre ou d'eau, caractérisée par un ensemble de propriétés spécifiques telles que la pression atmosphérique, la vitesse du vent, l'humidité et la température pour l'atmosphère. Les modèles climatiques simulent ainsi l'évolution des caractéristiques de chaque composante du système climatique en réponse à divers facteurs d'influence, tels que la quantité d'énergie solaire reçue et la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, tout en prenant en compte les interactions entre les composantes au sein des différentes mailles de la grille (voir Figure 33).

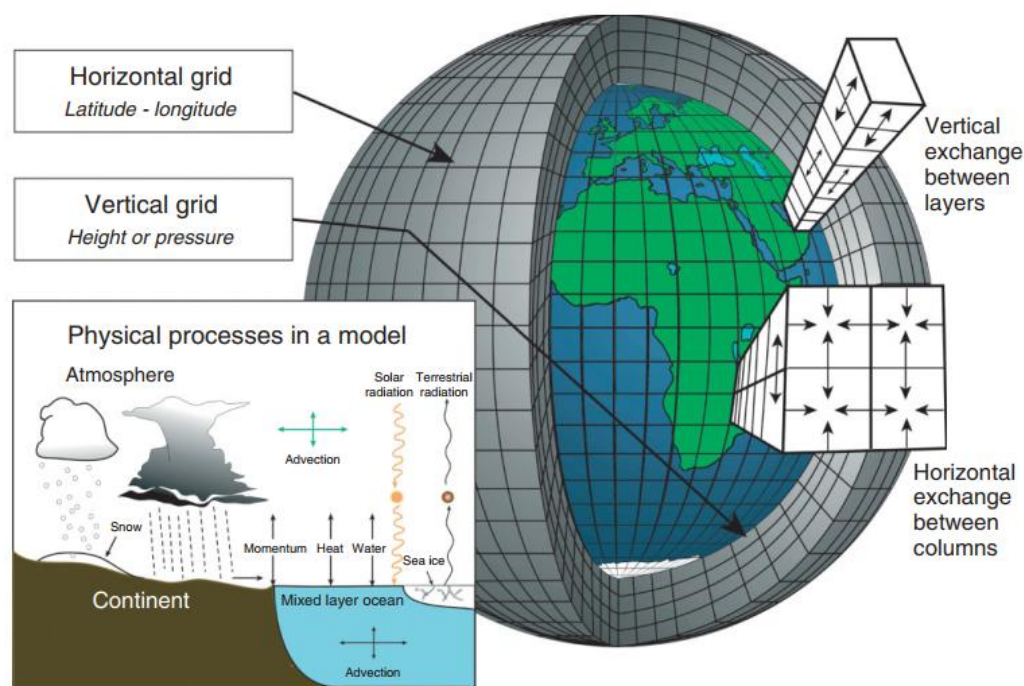


Figure 33: Représentation schématique de la structure de la grille cartésienne utilisée dans les MCG à différences finies (Edwards, 2011)

Le nombre final des mailles qui constituent la surface du globe définit la résolution du modèle climatique. Plus les mailles sont de tailles réduites, plus leur nombre est important, et donc plus la résolution du modèle est meilleure (Figure 34) (Mathez & Smerdon, 2018).

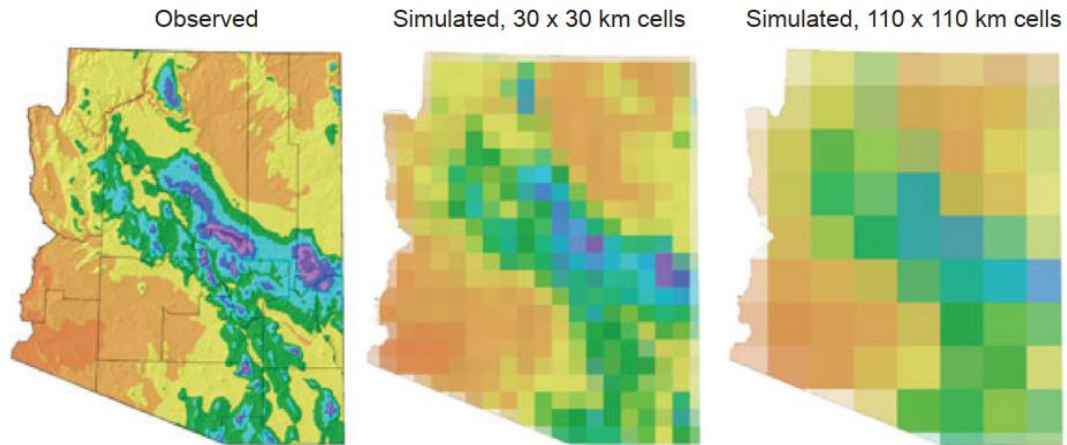


Figure 34: Comparaison entre les données observées et les résultats de modèles à différentes résolutions (Mathez & Smerdon, 2018)

Indubitablement, une résolution élevée (impliquant des mailles de dimensions plus petites) conduit à des résultats plus précis. Cependant, cette approche exige une puissance de calcul considérable et dépend de superordinateurs très énergivores (voir Figure 35). Par conséquent, un compromis entre la résolution nécessaire et la consommation énergétique est indispensable.



Figure 35: Le superordinateur Frontier ⁸ (Flickr, 2022)

⁸ Frontier est un superordinateur géré par le Laboratoire national d'Oak Ridge et le Département de l'énergie des états unis d'Amérique basé au Tennessee. Ce superordinateur a une performance de 1,102 exaFLOPS (<https://www.top500.org/lists/top500/2022/06/>) - c'est-à-dire une capacité d'effectuer 1,102 trillion de calculs par seconde.

La génération à venir de superordinateurs devrait bénéficier de progrès notables en termes de performance et d'efficacité énergétiques, conférant ainsi à ces systèmes une dimension plus respectueuse de l'environnement. Ces avancées devraient contribuer à l'amélioration de la résolution des modèles climatiques, facilitant ainsi la modélisation à grande échelle avec une précision accrue et une capacité de traitement augmentée. Divers pays ont élaboré plusieurs modèles, dont certains ont été utilisés dans le CMIP5 (WCRP, 2022) et qui sont présentés dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Liste et pays d'origine de quelques modèles climatiques globaux (IPCC, 2013)

Modèles du CMIP5	Pays d'origine
ACCESS1.0, ACCESS1.3	Australie
BCC-CSM1.1, BCC-CSM1.1(m)	Chine
BNU-ESM	Chine
CanCM4	Canada
CanESM2	Canada
CCSM4	États-Unis
CESM1 (BGC)	États-Unis
CESM1 (CAM5)	États-Unis
CESM1 (CAM5.1-FV2)	États-Unis
CESM1 (FASTCHEM)	États-Unis
CESM1 (WACCM)	États-Unis
CMCC-CESM	Italie
CMCC-CM, CMCC-CMS	Italie
CNRM-CM5	France
CSIRO-Mk3.6.0	Australie
EC-EARTH	Europe
FGOALS-g2	Chine
FGOALS-s2	Chine
FIO-ESM v1.0	Chine
GFDL-CM2.1	États-Unis
GFDL-CM3	États-Unis
GFDL-ESM2M, GFDL-ESM2G	États-Unis
GISS-E2-R, GISS-E2-H	États-Unis
GISS-E2-R-CC, GISS-E2-H-CC	États-Unis
HadCM3	Grande- Bretagne

HadGEM2-AO	Corée
HadGEM2-CC	Grande-Bretagne
HadGEM2-ES	Grande-Bretagne
INM-CM4	Russie
IPSL-CM5A-LR / -CM5A-MR / -CM5B-LR	France
MIROC4h, MIROC5	Japon
MIROC-ESM	Japon
MIROC-ESM-CHEM	Japon
MPI-ESM-LR / -ESM-MR / -ESM-P	Allemagne
MRI-CMCG3	Japon
MRI-ESM1	Japon
NCEP-CFSv2	États-Unis
NorESM1-M	Norvège
NorESM1-ME	Norvège

1.5.1 Évolution des modèles climatiques

Les premiers modèles climatiques globaux utilisaient des mailles de 500 km de coté.

L'idée d'utiliser la simulation numérique à l'étude du climat a émergé peu après le début de la réalisation des prévisions météorologiques numériques sur ordinateur dans les années 1950.

Au début du XX siècle, L.F. Richardson, a mis au point une théorie utilisant les équations de la mécanique des fluides pour effectuer une prévision météorologique. En raison des limites de paramètres de calcul nécessaires, les résultats de sa tentative furent décevants. Cependant, son travail s'est avéré déterminant pour les générations futures.

Dès 1950, et avec le développement des ordinateurs, des scientifiques se sont basés sur les travaux de Richardson pour produire des prévisions météorologiques numériques en utilisant des grilles cartésiennes (Figure 33 ci-dessus).

À partir de 1960, l'idée d'utiliser la simulation numérique pour modéliser le climat futur s'est développée sur la base des prévisions météorologiques.

Ces MCG de première génération incorporent la plupart des processus fondamentaux régissant la circulation atmosphérique globale. Ils se basent sur des équations mathématiques qui englobent les mécanismes dynamiques et physiques liés à la répartition horizontale de l'énergie, aux mouvements atmosphériques et aux échanges de masse entre l'équateur et les pôles. Des paramètres tels que le rayonnement solaire, l'albédo, l'absorption et la réflexion des rayons solaires par l'atmosphère sont pris en compte. De plus, les Modèles de Circulation Générale

Atmosphérique (AGCM) intègrent les transferts d'énergie verticaux via des processus radiatifs-convectifs (Edwards, 2011).

Vers la fin des années 1960, des chercheurs du laboratoire de Dynamique des Fluides Géophysiques de la NOAA, ont développé la génération suivante de Modèles Climatiques Globaux (MCG), également appelée Modèles de Circulation Atmosphérique et Océanique (AOGCM, Atmosphere-Ocean General Circulation Model), dans lesquels la circulation atmosphérique était couplée à la circulation océanique.

Ces modèles ont permis de réaliser des projections climatiques à une résolution d'environ 500 km (Lamy, 2013). À partir des années 1980, une nouvelle génération de modèles, appelée "modèles de système terrestre" (ESM ; Earth System Model), a été développée. Ces modèles intègrent les modèles atmosphère-océan (AOGCM) avec d'autres cycles tels que les cycles biogéochimiques et du carbone. De plus, ils prennent en compte d'autres composantes importantes du système climatique, comme la cryosphère (glace de mer et couverture neigeuse), l'hydrologie (lacs, rivières, évaporation et précipitations) et la végétation (Edwards, 2011). La Figure 36 illustre le processus d'évolution de ces modèles en fonction des paramètres physiques.

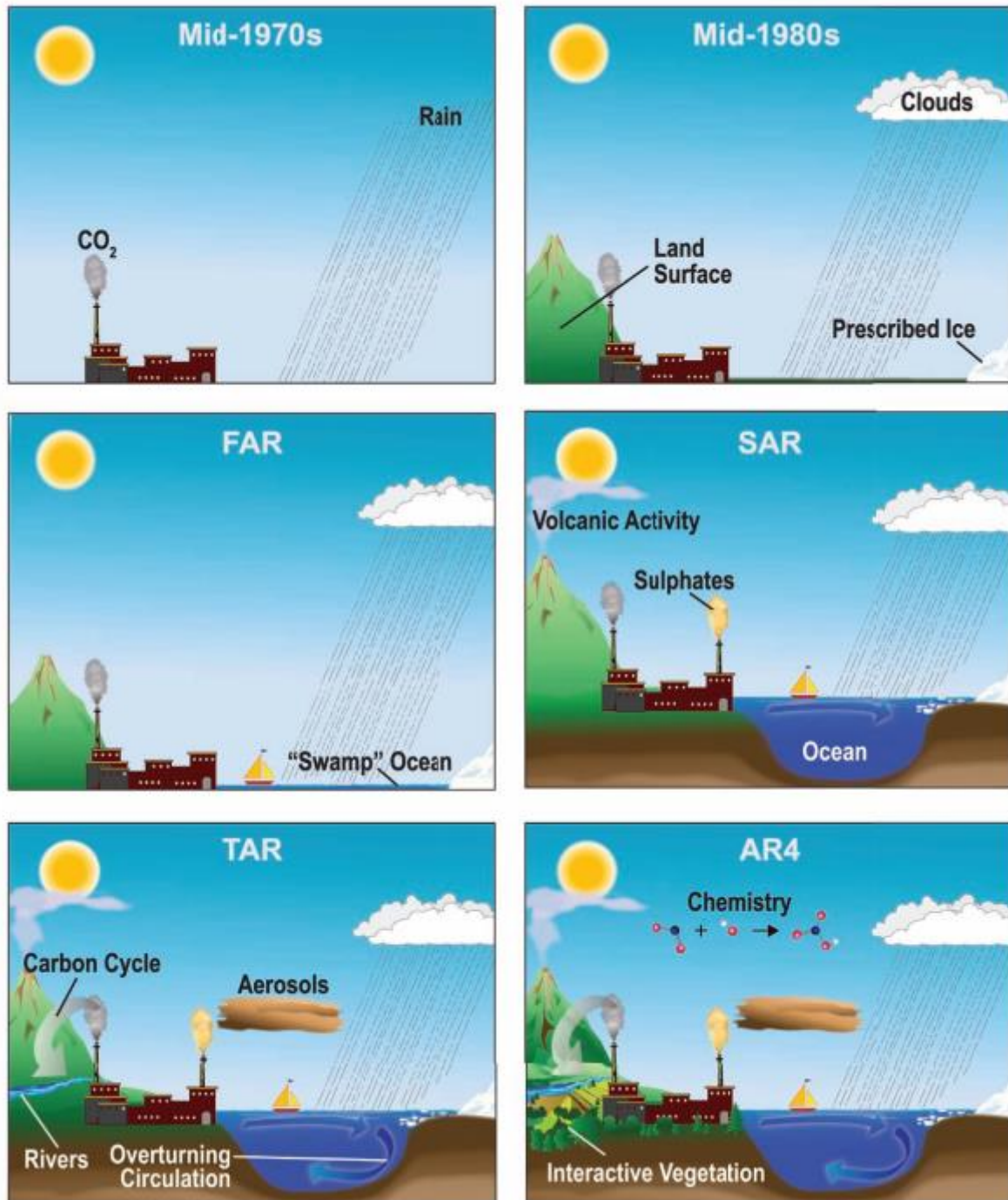


Figure 36: Processus d'évolution des modèles climatiques (Solomon et al., 2007)

Le développement des calculateurs ont permis l'amélioration de la résolution des modèles climatiques. Les Figures 37 et 38 montrent l'évolution de la résolution des modèles à travers le temps.

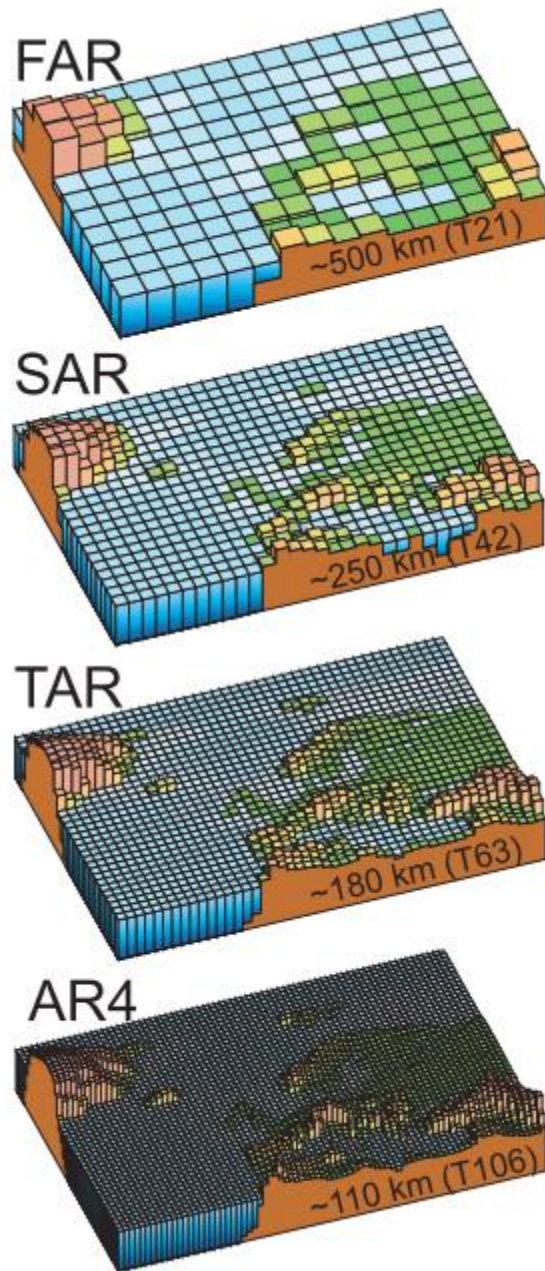


Figure 37: Évolution de la résolution des modèles climatiques globaux dans les différents rapports du GIEC (Solomon et al., 2007)

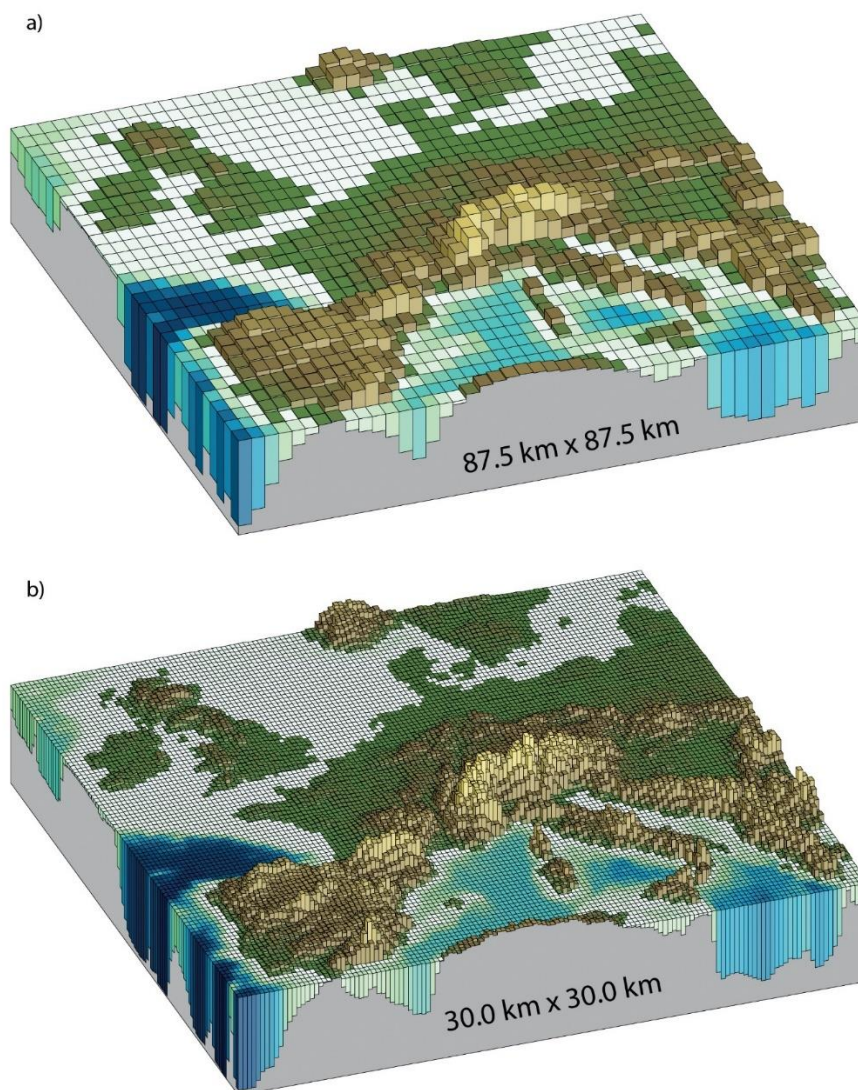


Figure 38: Évolution de la résolution des modèles climatiques globaux dans les différents rapports du GIEC (IPCC, 2013)

1.5.2 La descente d'échelle

Les modèles climatiques globaux simulent le climat futur de toute la surface planétaire sur plusieurs centaines d'années, avec une résolution d'une centaine de kilomètres. Cependant, les études à l'échelle locale d'impact et d'adaptation au changement climatique exigent plus de détails ; une résolution plus fine est donc requise (Takayabu et al., 2016; Ekström et al., 2015). La capacité des ordinateurs de modéliser le climat planétaire à une échelle plus fine est aujourd'hui hors de portée. Pour pallier à ce manque, les scientifiques se tournent vers une technique appelée descente d'échelle (« *downscaling* » en anglais) (Fatichi et al., 2011). Cette méthode permet d'augmenter la précision des données spatiales et temporelles des modèles de circulation générale à grande échelle pour les adapter aux données locales à une échelle plus fine (Figure 39).

La réduction d'échelle spatiale fait référence à l'application de méthodes visant à générer des informations climatiques à une résolution plus fine en se basant sur les sorties de modèles climatiques mondiaux (MCG) qui ont une résolution plus grossière. Par exemple, elle permet de convertir les sorties d'un MCG, qui sont représentées par des cellules de grille d'environ une centaine de kilomètres, en une résolution de 20 kilomètres, voire plus fine, pour un emplacement spécifique.

La réduction d'échelle temporelle vise à obtenir des informations temporelles plus détaillées à partir des sorties temporelles à plus grande échelle des modèles climatiques globaux (MCG), telles que la génération de séquences de précipitations journalières à partir de données mensuelles ou saisonnières de précipitations.

Ces différentes méthodologies peuvent être utilisées pour affiner l'échelle temporelle des sorties mensuelles des Modèles Climatiques Globaux (MCG) et obtenir ainsi des informations localisées à l'échelle quotidienne (Trzaska & Schnarr, 2014).

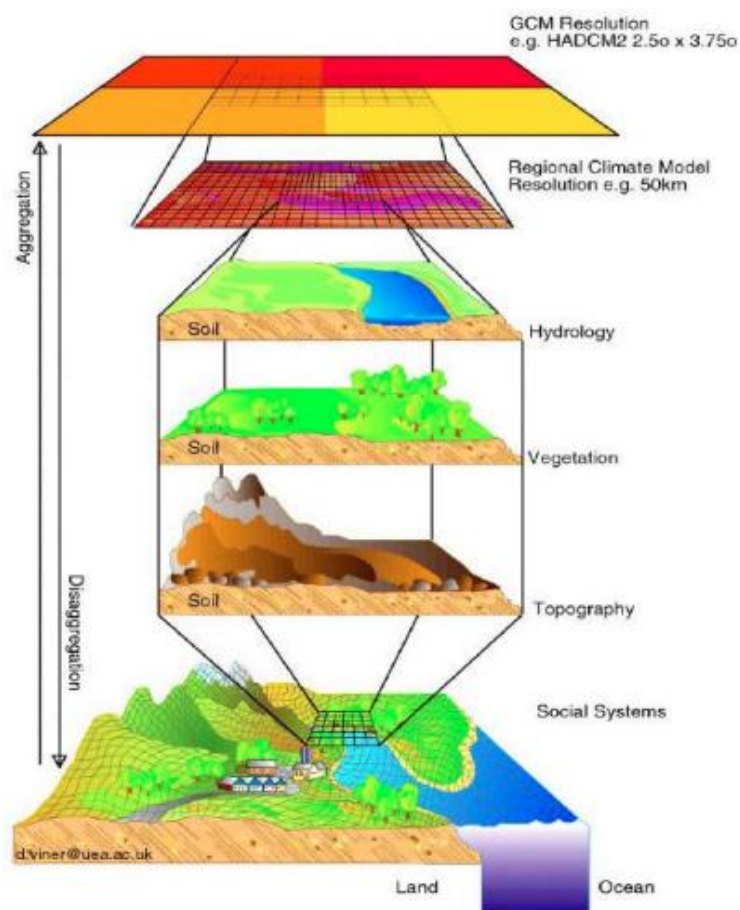


Figure 39: Le concept de descente d'échelle (Trzaska & Schnarr, 2014)

La descente d'échelle est accomplie généralement par le biais de deux approches distinctes : la méthode dynamique et la méthode statistique (Figure 40).

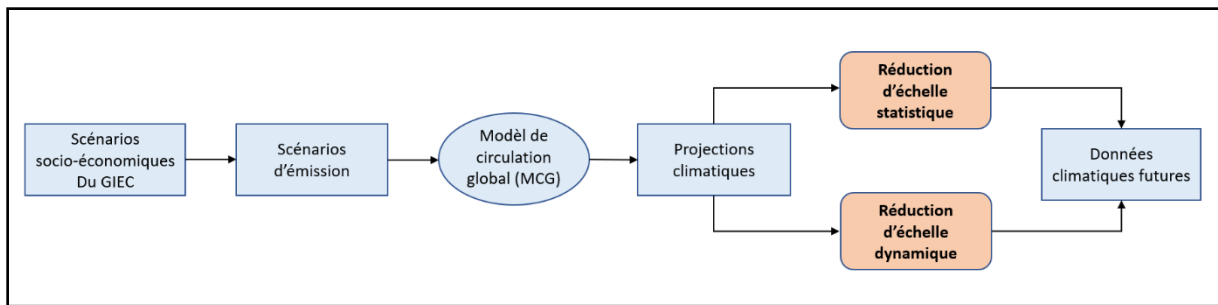


Figure 40: Schéma du processus de production des fichiers climatiques futurs par l'approche « descente d'échelle » (Adapté par l'auteur à partir de Berardi & Jafarpur, 2020)

1.5.2.1 Descente d'échelle dynamique

La descente d'échelle dynamique se base sur l'utilisation d'un modèle climatique régional (MCR), semblable au MCG dans ses fondements mais à haute résolution (Trzaska & Schnarr, 2014). Les MCR sont conditionnés dans leurs limites par les résultats des modèles climatiques globaux (Moufouma-Okia, 2012). Les Modèles climatiques régionaux ont l'avantage de mieux représenter les processus physiques importants, et sont utilisés pour augmenter la résolution horizontale de la modélisation climatique dans une région précise de la surface terrestre. En raison de leurs plus grandes résolutions, ces modèles peuvent mieux représenter les montagnes, les côtes, les masses d'eau et les contours (Lamy, 2013). Ils peuvent également afficher des caractéristiques plus fines que les modèles globaux. Étant corrélé aux MCG, les MCR garantissent la cohérence des paramètres climatiques dans le temps et l'espace tout en affichant des caractéristiques plus fines que les modèles globaux (Charron, 2016).

Cette méthode peut ainsi avoir une résolution généralement de 10 à 25 km. Cependant elle est très coûteuse en données et en temps de calcul (Charron, 2016).

1.5.2.2 Descente d'échelle statistique

La descente d'échelle statistique permet d'établir des corrélations statistiques entre les variables climatiques observées localement (prédicteurs) et les variables climatiques à plus grande échelle (les prédicteurs) issues des MCG (Charron, 2016; Wilby et al., 2004).

La réduction d'échelle statistique est relativement plus simple en temps et en données de calcul impliqués (Trzaska & Schnarr, 2014). Ce processus comprend deux étapes principales. La première consiste au développement des relations statistiques entre les variables climatiques observables (généralement fournies par les enregistrements historiques d'une station météorologique) et les variables à plus grande échelle (MCG) (Zorita and von Storch 1999). Elle s'appuie ensuite sur la relation antérieure pour simuler les conditions climatiques locales (Bazazzadeh et al., 2021).

En raison de son efficacité de calcul, cette méthode est beaucoup plus apte à utiliser plusieurs modèles de circulation générale (Bader et al., 2008).

Berrardi et al. (Berardi & Jafarpur, 2020) affirment, dans ce contexte, que l'utilisation de plusieurs modèles climatiques globaux (MCG) plutôt que d'un modèle unique pour la génération de fichiers météorologiques futurs produit des résultats statistiquement significatifs.

1.4.2.3 Les générateurs stochastiques

La réduction d'échelle statistique recourt généralement aux générateurs stochastiques.

Les générateurs stochastiques sont des programmes informatiques, qui créent de longues séries chronologiques de variables météorologiques synthétiques dont les caractéristiques statistiques sont similaires aux données météorologiques historiques observées (Wilks & Wilby, 1999).

Les générateurs stochastiques sont des outils peu coûteux en demande de calcul permettant de simuler des scénarios climatiques futurs des variables météorologiques avec de hautes résolutions spatiales et temporelles, basés sur la réduction d'échelle des sorties des simulations à grandes échelles de plusieurs modèles climatiques globaux (MCG) (Semenov, 2008) (Qian et al., 2008).

En général, les générateurs stochastiques sont utilisés pour générer les données météorologiques synthétiques nécessaires à la modélisation climatique, ou pour constituer des séries de données historiques à long terme, surtout si certains ensembles de données ou variables météorologiques sont manquants (Chisanga et al., 2017).

L'utilisation de modèles météorologiques stochastiques pour la création de données météorologiques futures est importante, particulièrement dans les régions qui ne disposent pas de données historiques (Berardi & Jafarpur, 2020).

Il existe plusieurs programmes de générateurs stochastiques, parmi lesquels on peut citer notamment :

- **Meteonorm**

Meteonorm est un outil de génération stochastique qui permet de fournir des données météorologiques pour n'importe quel site dans le monde. Ce générateur utilise des méthodes d'extrapolation à partir de données météorologiques statistiques. Il utilise une base de données climatiques, un outil d'interpolation spatiale et un générateur de météo stochastique. Les données de radiation globale sont obtenues à partir du Global Energy Balance Archive (GEBA) (Remund et al., 2010, Herrera et al., 2017).

Meteonorm génère de manière stochastique des années typiques des paramètres météorologiques essentiels pour les calculs de performance énergétique des bâtiments tels que la température de l'air, l'humidité, les précipitations, la vitesse et la direction du vent, ainsi que le rayonnement solaire, notamment l'irradiation normale directe et diffuse. Ces données sont fournies à différentes résolutions temporelles : mensuelles, quotidiennes, horaires ou par minute, et sont présentées dans divers formats, notamment le format EnergyPlus Weather (EPW) et TMY (Typical Meteorological Year) (Yassaghi et al., 2019).

La version récente de Meteonorm fournit des données historiques, des données contemporaines et plusieurs intervalles de temps jusqu'à l'année 2100 (Tsoka et al., 2021). Elle intègre également trois scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (RCP), à savoir RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5. Ces scénarios sont obtenus en moyennant les données issues de dix modèles climatiques mondiaux qui ont été adoptés dans le cadre du cinquième rapport d'évaluation du GIEC (AR5).

- **CCWorldWeatherGen**

Le CCWorldWeatherGen est un générateur de données météorologiques développé par Jentsch et al. (Jentsch et al., 2013) de l'université de Southampton. Ce générateur de données utilise comme base la plateforme de Microsoft® Excel. Cet outil transforme les fichiers météorologiques sous format EPW ou TMY actuels en fichiers EPW ou TMY futurs. À cet effet, Il utilise la technique d'ajustement des séries chronologiques connue sous le nom de « morphing », développée par Belcher (Belcher et al., 2005), afin de réduire l'échelle des sorties du modèle climatique global Hadley Center Version 3 (HadCM3) contraint par le scénario d'émission A2 du GIEC. Cette approche permet ainsi de générer des données météorologiques futures à résolution horaire, qui sont ultérieurement employées dans les simulations thermiques des bâtiments (Yassaghi et al., 2019).

Il se base sur les données climatiques de références entre 1961-1990 pour produire des fichiers climatiques pour trois horizons temporels futurs, à savoir les années 2020, 2050 et 2080 (Moazami et al., 2019).

- **WeatherShift**

WeatherShift™ est un outil qui génère des fichiers météorologiques horaires futurs en utilisant la méthode du « morphing » sur les résultats de sortie de 14 MCGs utilisés dans le cadre du cinquième rapport du GIEC. Il se base sur la période de référence de 1976-2005 pour faire des projections sur trois horizons futurs (2035, 2065, 2090) et pour deux scénarios d'émissions (RCP4.5 et RCP8.5). WeatherShift™ offre une fonction de distribution cumulative (CDF) pour chacune des variables météorologiques en utilisant une interpolation linéaire entre les valeurs du modèle (Dickinson & Brannon, 2016; Troup, 2016).

- **Autres**

Bien d'autres générateurs existent, Herrera et al. (Herrera et al., 2017) fournissent une revue des générateurs les plus connus.

1.6 Les scénarios climatiques

Étant donné que la concentration des gaz à effet de serre (GES) représente l'un des principaux facteurs influençant l'évolution des conditions climatiques, les scientifiques ont élaboré un ensemble de scénarios qui englobent différentes hypothèses de développement des GES dans l'atmosphère. Ces scénarios prennent en compte divers facteurs socio-économiques, démographiques et technologiques qui ont un impact sur l'évolution des niveaux de GES dans l'atmosphère.

1.6.1 Les scénarios « SRES » (Special Reports on Emission)

Le GIEC a publié le rapport spécial sur les scénarios d'émissions (SRES) « Special Report on Emission Scenarios » en 2000. Ce document propose de nombreux scénarios pour prédire les climats futurs en tenant compte de divers niveaux d'émission de gaz à effet de serre. Ces scénarios futurs SRES ont été utilisés dans le troisième (TAR) et quatrième (AR4) rapports d'évaluation du GIEC, publiés respectivement en 2001 et 2007. Les scénarios futurs SRES sont des scénarios de référence qui ne tiennent pas compte des mesures de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Six scénarios d'émissions, nommés A1F1, A1B, A1T, A2, B1 et B2, ont été élaborés en se basant sur les prévisions des conditions sociales futures, l'évolution de la population mondiale, la protection environnementale, le développement et l'intégration des technologies énergétiques, ainsi que l'accroissement et la mondialisation économique. La Figure 41 illustre la projection de tous les scénarios futurs des SRES, tandis que le Tableau 6 présente leurs principales caractéristiques.

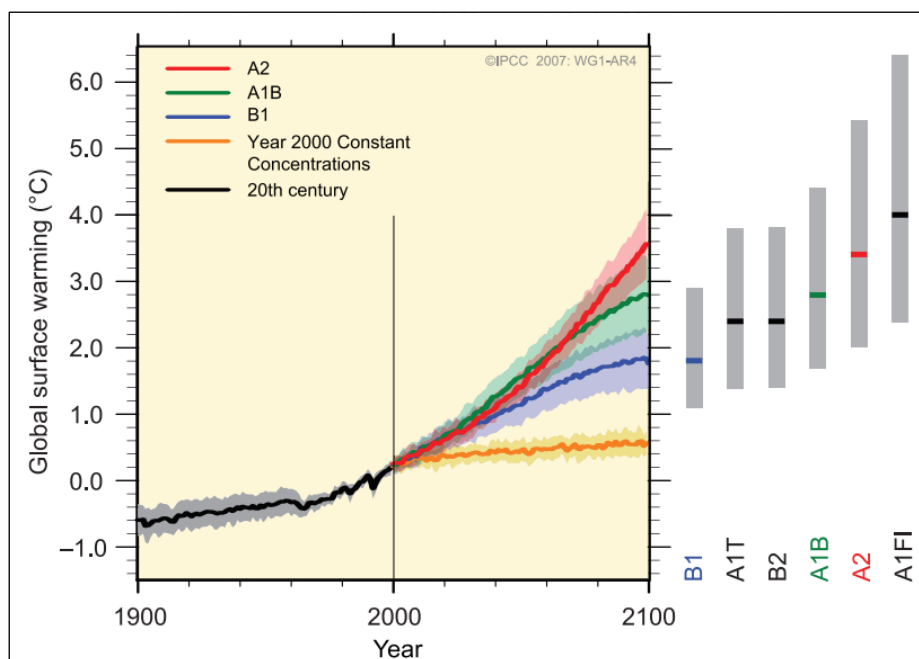


Figure 41: Évolution du réchauffement global selon les scénarios SRES (Solomon et al., 2007)

Tableau 6: Description des scénarios SRES (adapté par l’auteur à partir de Goosse et al., 2010; IPCC, 2000; Verichev et al., 2020)

Scénarios SRES		Forces motrices			
		Technologies Énergétiques	Population Mondiale	Environnement	Situation Économique
A1	A1T	<i>Exploitation intensive des énergies fossiles</i>	Atteint 9 milliards en 2050 et diminue ensuite	Émergence de nouvelles technologies pour protéger l’environnement	Développement économique rapide.
	A1B	<i>Exploitation équilibrée des ressources</i>			
	A1F1	<i>Exploitation des énergies renouvelables</i>			
A2		Progrès technologique hétérogène et lent	Augmentation constante	Divergence dans les solutions	Croissance économique régionale
B1		Développement rapide des technologies propres fondées sur l’utilisation efficace des ressources	Atteint 9 milliards en 2050 et diminue ensuite	Diminution de l’utilisation des technologies et des énergies propres.	Croissance très rapide orientée vers le développement des services et de l’information
B2		Développement lent, et différencié selon les régions	Augmentation constante mais à un rythme plus lent que celui du scénario A2.	Évolution rapide de la technologie mais de manière plus hétérogène que les scénarios A1 et B2	Croissance économique modérée

1.6.2 Les scénarios « RCP » (*Representative Concentration Pathways*)

Dans le cadre du cinquième rapport du GIEC (IPCC, 2013), quatre nouveaux scénarios ont été introduits, connus sous le nom de "Voies de Concentration Représentatives" (*Representative Concentration Pathways - RCP*). Ces quatre scénarios climatiques distincts, identifiés comme RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 et RCP8.5, reposent sur des projections des taux de variation du forçage radiatif total prévus d'ici 2100 par rapport aux niveaux préindustriels : +2.6, +4.5, +6.0 et +8.5 W/m², respectivement (voir Figure 42). Les RCP prennent en compte divers aspects socio-économiques tels que la croissance démographique, le développement économique et les progrès technologiques. Le Tableau 7 résume les caractéristiques clés de ces scénarios.

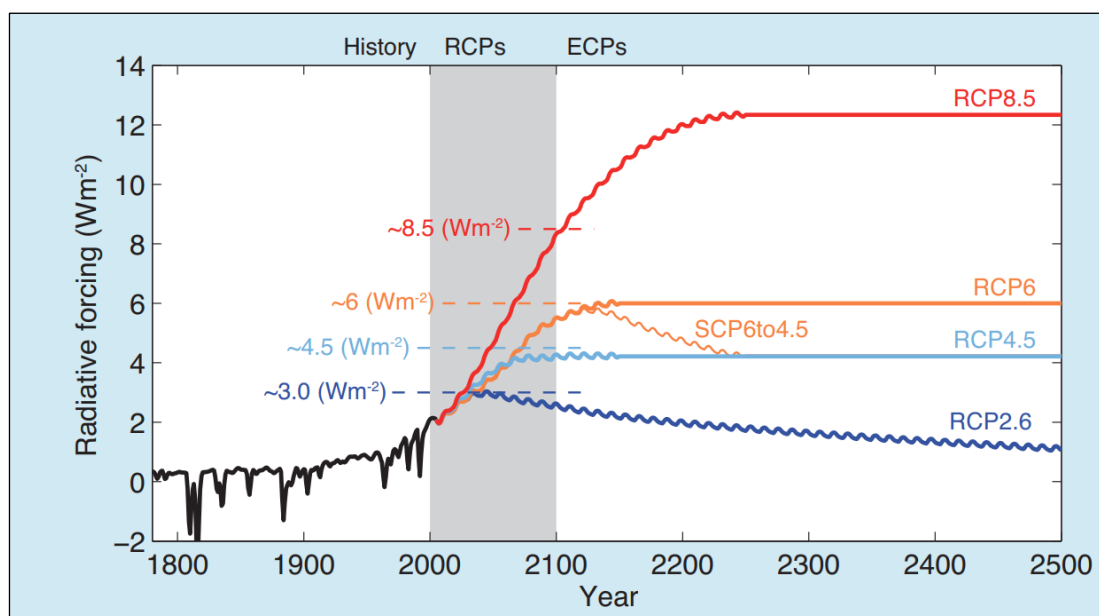


Figure 42: Forçage radiatif total des différents scénarios RCP (IPCC, 2013)

Tableau 7: Description des scénarios RCP (IPCC, 2014 ; van Vuuren et al., 2011)

Scénario	Forçage radiatif total (W/m ²)	Concentration de CO ₂ en 2100 (ppm)	Variation de température en 2100 par rapport à 1985-2005 (°C)	Actions
RCP2.6	Le forçage radiatif culmine à 3 W/m ² , puis décline après 2100	450 (430 à 480)	0.3 à 1.7	<ul style="list-style-type: none"> • Diminution de l'utilisation des énergies fossiles • Une population de 9 milliards en 2100 • Réduction de 40 % des émissions de méthane. • Augmentation de l'utilisation des Terres agricoles en raison de la production de bioénergie • Faible consommation énergétique
RCP4.5	Stabilisation du forçage	650 (580 à 750)	1.1 à 2.6	<ul style="list-style-type: none"> • Baisse de la consommation d'énergie. • Politique de reforestation.

	radiatif à 4,5 W/m ² après 2100			<ul style="list-style-type: none"> • Diminution des Terres cultivées en raison de l'augmentation des rendements. • Mesures climatiques strictes. • Émissions de méthane constantes
RCP6.0	Stabilisation du forçage radiatif à 6,0 W/m ² après 2100	850 (720 à 1000)	1.4 à 3.1	<ul style="list-style-type: none"> • Forte dépendance aux énergie fossiles. • Utilisation énergétique intermédiaire. • Hausse des Terres cultivées. • Émissions de méthane stables
RCP8.5	Augmentation du forçage radiatif jusqu'à 8,5 W/m ² d'ici 2100	1370 (>1000)	2.6 à 4.8	<ul style="list-style-type: none"> • Forte dépendance aux énergies fossiles. • Aucune politique de réduction des émissions. • Augmentation rapide des émissions de méthane. • Des émissions de CO₂ trois fois plus importantes à l'horizon 2100. • Exploitation intensive des Terres cultivées. • Une population de 12 milliards en 2100. • Ralentissement du progrès technologique.

1.6.3 Les scénarios « SSP » (Shared Socioeconomic Pathway)

Ultérieurement, d'autres types de scénarios appelées « SSP » ont été élaborés pour compléter les RCP (Representative Concentration Pathways) utilisés dans les modèles climatiques du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). Les SSP se concentrent sur les aspects socio-économiques et décrivent différentes voies possibles de développement mondial en tenant compte de facteurs tels que la croissance économique, la population, la technologie, la gouvernance, les politiques, etc.

Les SSP sont étiquetés de 1 à 5 pour représenter une gamme de futurs possibles, allant de scénarios où les émissions de gaz à effet de serre sont fortement réduites (SSP1) à des scénarios où ces émissions continuent d'augmenter (SSP5). Chaque SSP explore des mondes possibles avec des hypothèses sur la manière dont les sociétés pourraient évoluer, notamment en ce qui concerne la démographie, l'économie, la technologie, les politiques, et l'utilisation des ressources (ADEME, 2013 ; Le climat en questions, n.d.).

1.6.4 Le Changement climatique projeté

1.6.4.1 Le changement climatique projeté à l'échelle globale suivant les scénarios RCP

Malgré la mise en œuvre actuelle de politiques de développement durable et d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre, il est prévu que les concentrations de ces gaz continueront de croître au cours des décennies à venir, amplifiant les changements climatiques observés au 20ème siècle par l'intermédiaire de mécanismes de rétroaction (IPCC, 2007 ; IPCC, 2013). Selon le scénario RCP d'émission de gaz à effet de serre envisagé (Tableau 7 et Figure 42), la température à la surface du globe devrait connaître une augmentation de 1.8 à 4°C d'ici la fin du 21ème siècle (Figure 43).

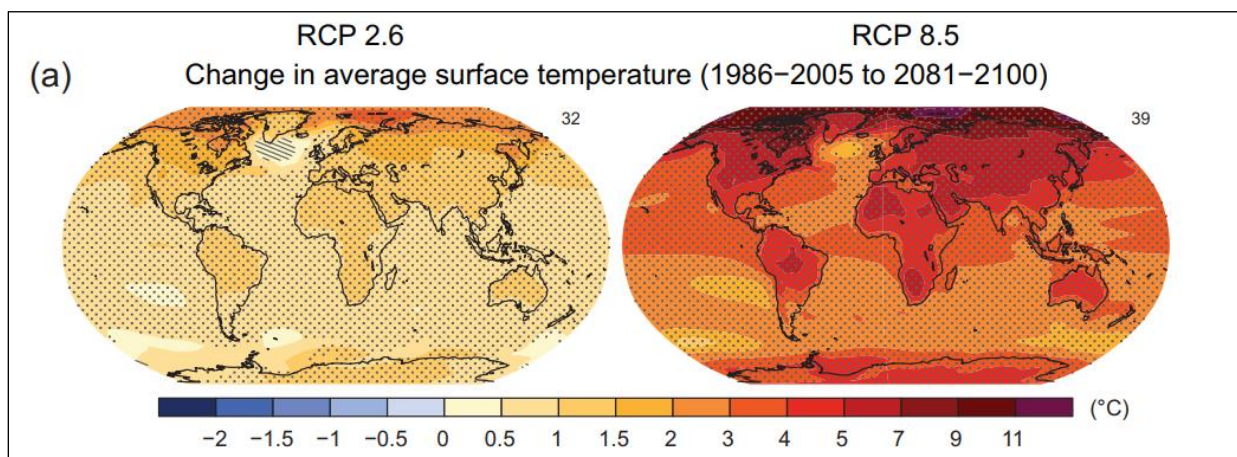


Figure 43: Changement de température en surface projeté pour la période 2081-2100 par rapport à la période 1986-2005 (IPCC, 2013)

La Figure 44 illustre la trajectoire temporelle de l'évolution de la température mondiale en fonction des divers scénarios RCP.

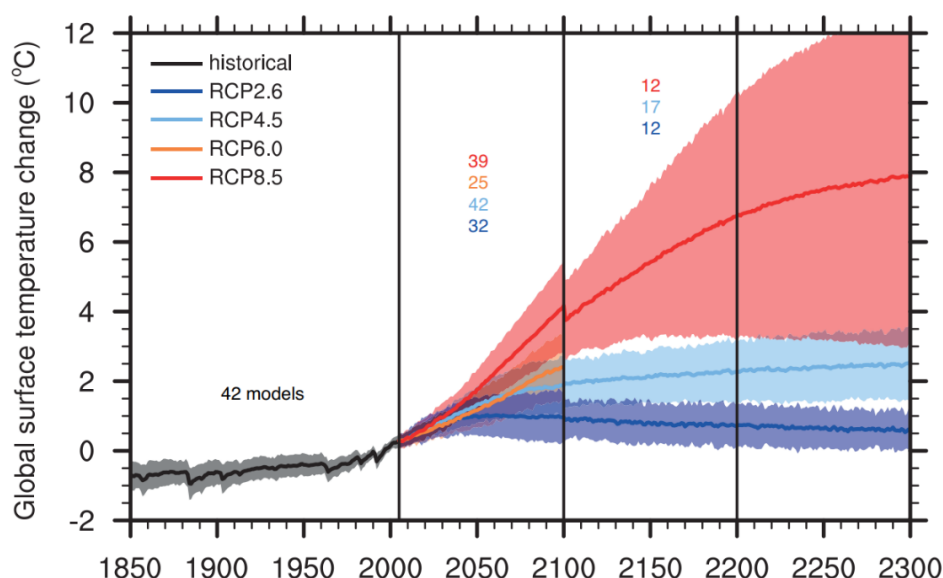


Figure 44: Évolution de la température moyenne de surface selon les scénarios RCPs (IPCC,

2013)

En ce qui concerne les précipitations (Figure 45), il est très probable qu'elles connaissent une augmentation aux latitudes élevées, tandis qu'il est probable qu'elles connaissent une diminution dans la plupart des régions continentales et subtropicales. Les épisodes climatiques extrêmes devraient devenir plus fréquents, conformément aux évaluations du GIEC.

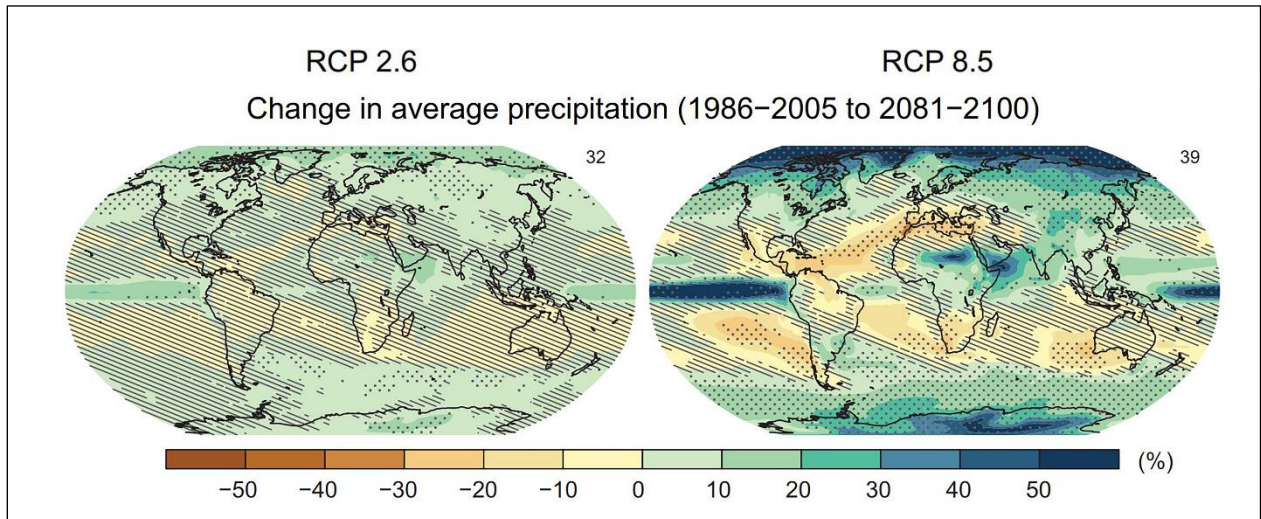
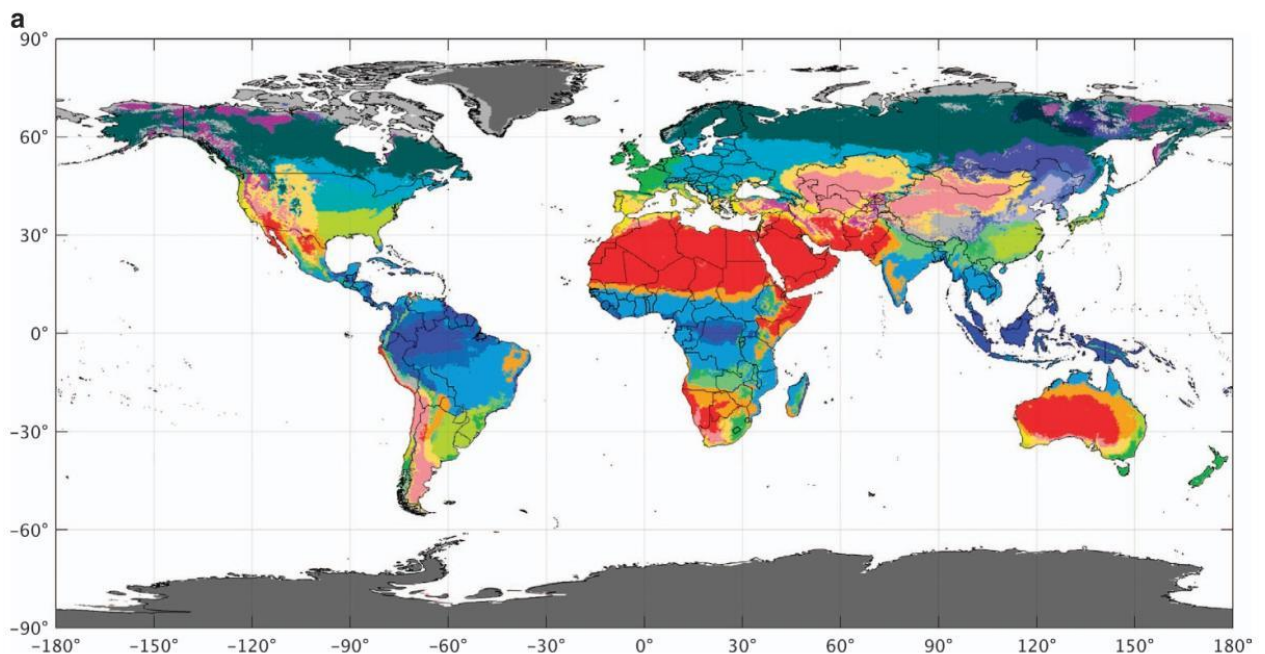


Figure 45: Changement de précipitations en surface projeté pour la période 2081-2100 par rapport à la période 1986-2005 (IPCC, 2013)

La Figure 46 présente la classification climatique de Köppen-Geiger pour la période climatique actuelle (1980-2016) ainsi que pour les projections futures (2071-2100), démontrant les modifications climatiques mondiales en cours et à venir.



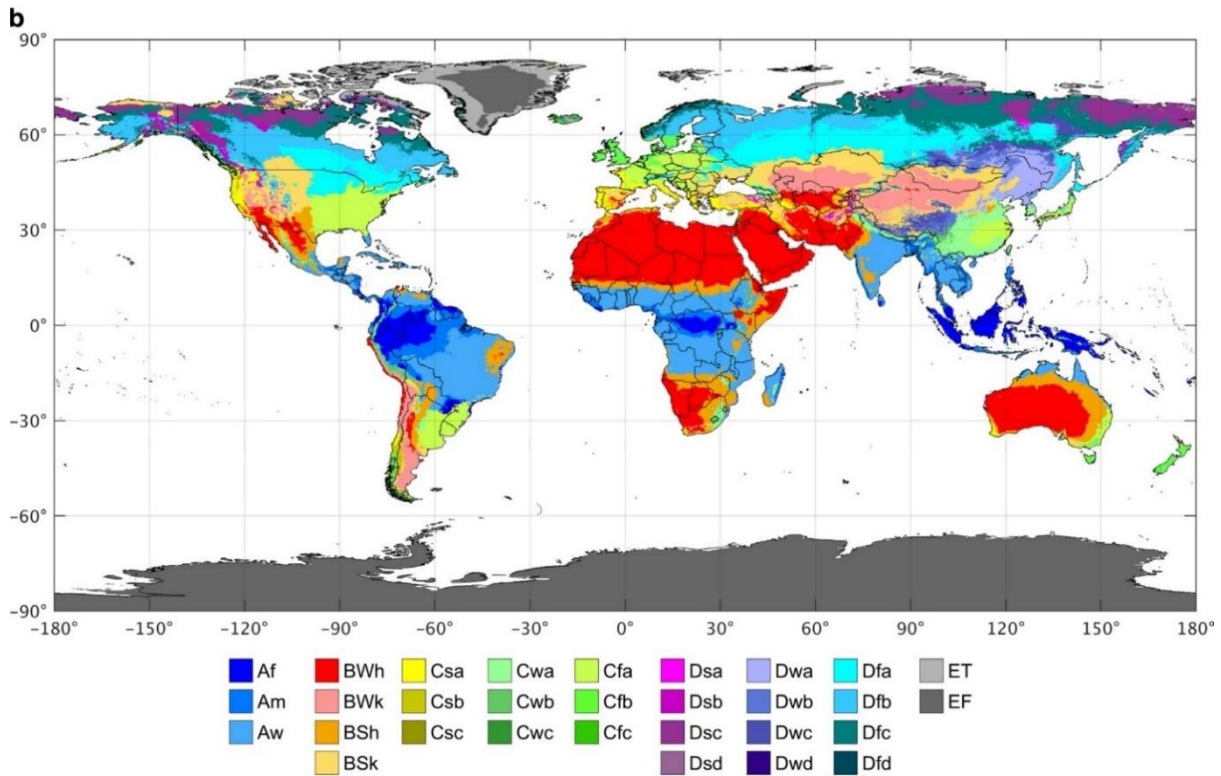


Figure 46: Classification climatique Köppen-Geiger du climat actuel (1980–2016) et pour les projections futures (2071-2100) (Beck et al., 2018).

1.6.4.2 Le changement climatique projeté dans la région méditerranéenne

Selon les projections futures, le vaste Bassin méditerranéen est considéré comme l'une des régions les plus sensibles au réchauffement planétaire. Des études antérieures ont identifié la région comme l'un des points chauds les plus marqués du changement climatique (Giorgi et Lionello 2008 ; Diffenbaugh et Giorgi 2012 ; Lionello 2012 ; Lionello et Scarascia, 2008).

La zone méditerranéenne pourrait connaître une augmentation allant de 0.9 à 5.6°C, selon les scénarios RCP, d'ici la fin du siècle. Cette augmentation de température serait 20% de plus par rapport à la moyenne annuelle mondiale, et d'environ 50% en été (Figure 47). Cette augmentation entraînerait des effets tels que la fonte accélérée des glaciers, la sécheresse accrue et la dégradation des sols (MedECC, 2020).

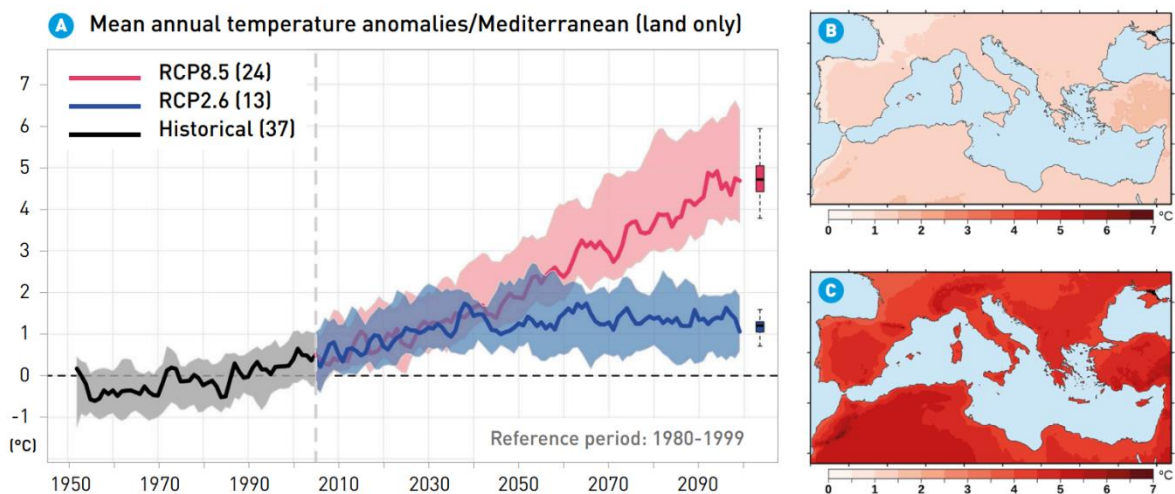


Figure 47: Changement projeté de la température annuelle dans le Bassin méditerranéen par rapport à la période de référence récente (1980-1999). A : simulations pour les scénarios RCP2.6 et RCP8.5. B : réchauffement à la fin du 21e siècle (2080-2099) pour le scénario RCP2.6. C : idem pour le scénario RCP8.5 (MedECC, 2020)

D'autre part, les précipitations connaîtront une diminution significative de l'ordre de 4% par degré de réchauffement. Cela signifie de possibles diminutions des précipitations de l'ordre de 4 % à 22 % à la fin du 21e siècle, selon le scénario en considération (UNEP/MAP & Plan Bleu, 2020) (Figure 48).

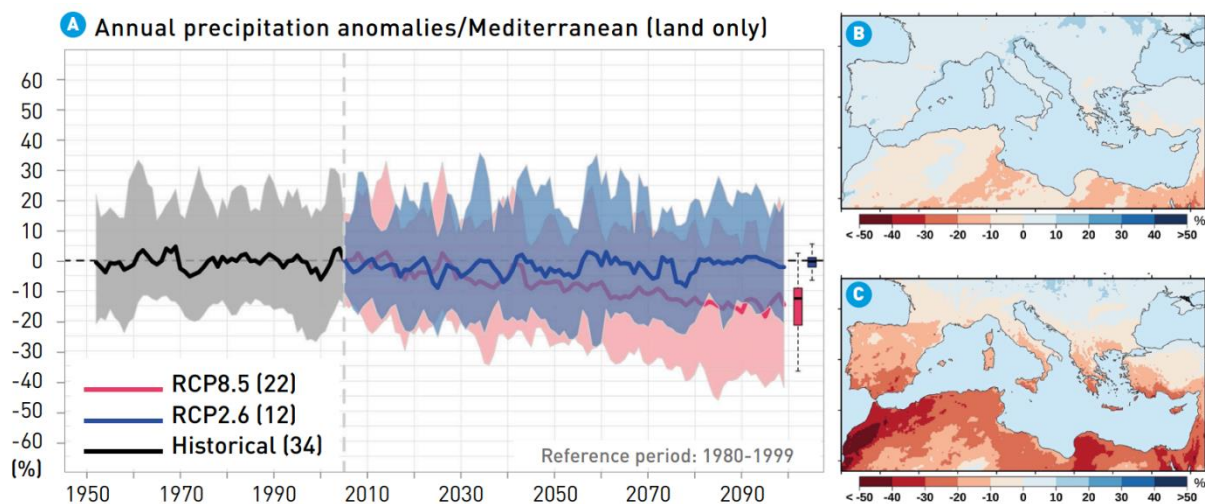


Figure 48: Changement projeté des précipitations annuelles dans le Bassin méditerranéen par rapport à la période de référence récente (1980-1999). A : simulations pour les scénarios RCP2.6 et RCP8.5. B : anomalies des précipitations à la fin du 21e siècle (2080-2099) pour le scénario RCP2.6. C : idem pour le scénario RCP8.5 (MedECC, 2020)

Par ailleurs, ce changement climatique exerce une influence notable sur l'écosystème de la mer Méditerranée, qui est prédisposée à subir des vagues de chaleur de plus en plus intenses. Ces

phénomènes, caractérisés par des périodes prolongées de températures élevées, devraient s'observer de manière accrue durant la période s'étendant de juin à octobre (Figure 49).

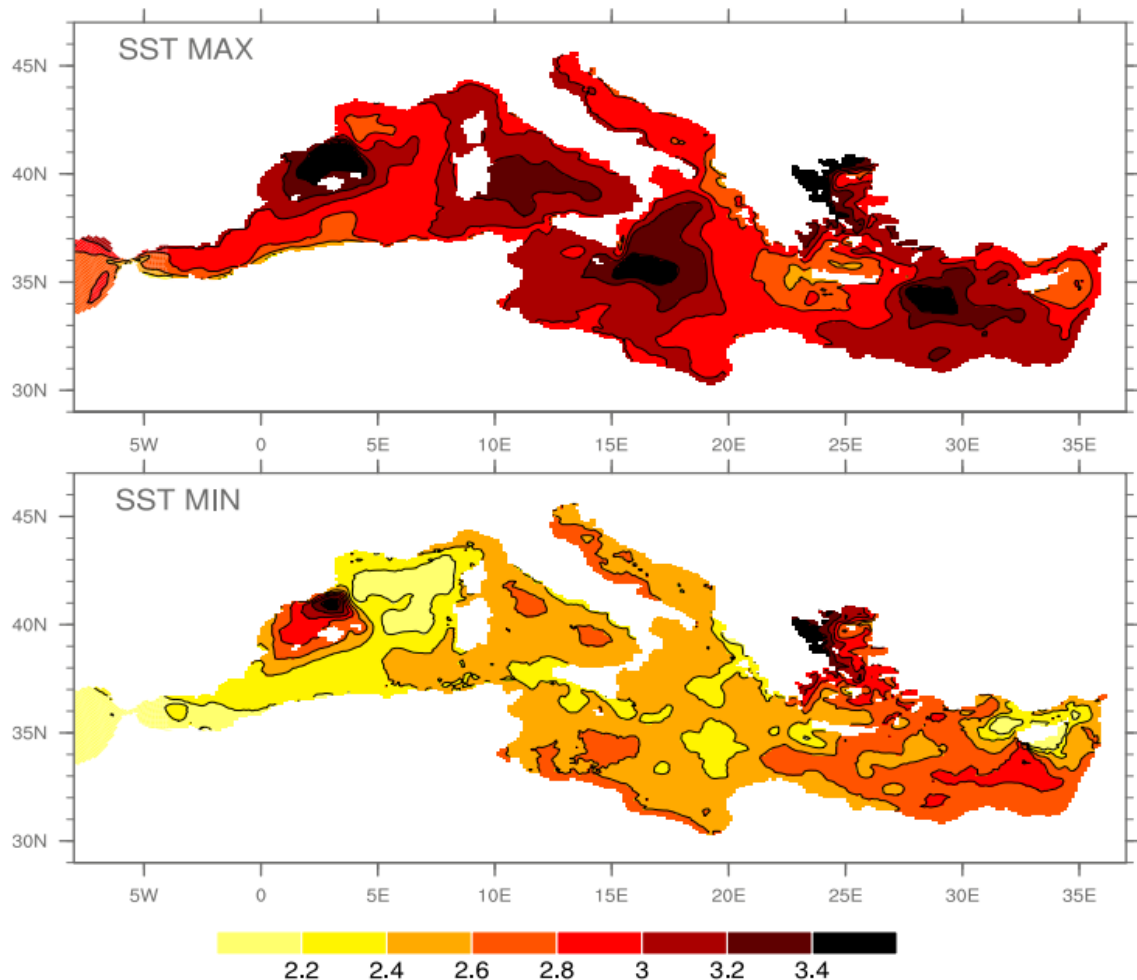


Figure 49: Anomalies de température de surface de la mer Méditerranée pour la période 2070-2099 (par rapport à 1961-1990). Maximales (en haut) et minimales (en bas) (UNEP/MAP & Plan Bleu, 2020)

1.6.4.3 Le changement climatique projeté en Algérie

Selon une étude de Zeroual et al. (Zeroual et al., 2020), les températures moyennes annuelles augmenteront sur la période 2006-2060 à un rythme de $+0,02\text{ C}^\circ/\text{an}$ à $+0,04\text{ C}^\circ/\text{an}$ dans le Nord et de $+0,04\text{ C}^\circ/\text{an}$ à $+0,06\text{ C}^\circ/\text{an}$ dans le Sud pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 (Figure 50). Au cours de la deuxième période (2045-2100), le taux d'augmentation est de $+0,02\text{ C}^\circ/\text{an}$ sur l'ensemble du pays pour le scénario RCP4.5. Pour le scénario RCP8.5, ce taux varie de $+0,04\text{ C}^\circ/\text{an}$ à $+0,06\text{ C}^\circ/\text{an}$ dans le Nord et de $+0,06\text{ C}^\circ/\text{an}$ à $+0,08\text{ C}^\circ/\text{an}$ dans le Sud.

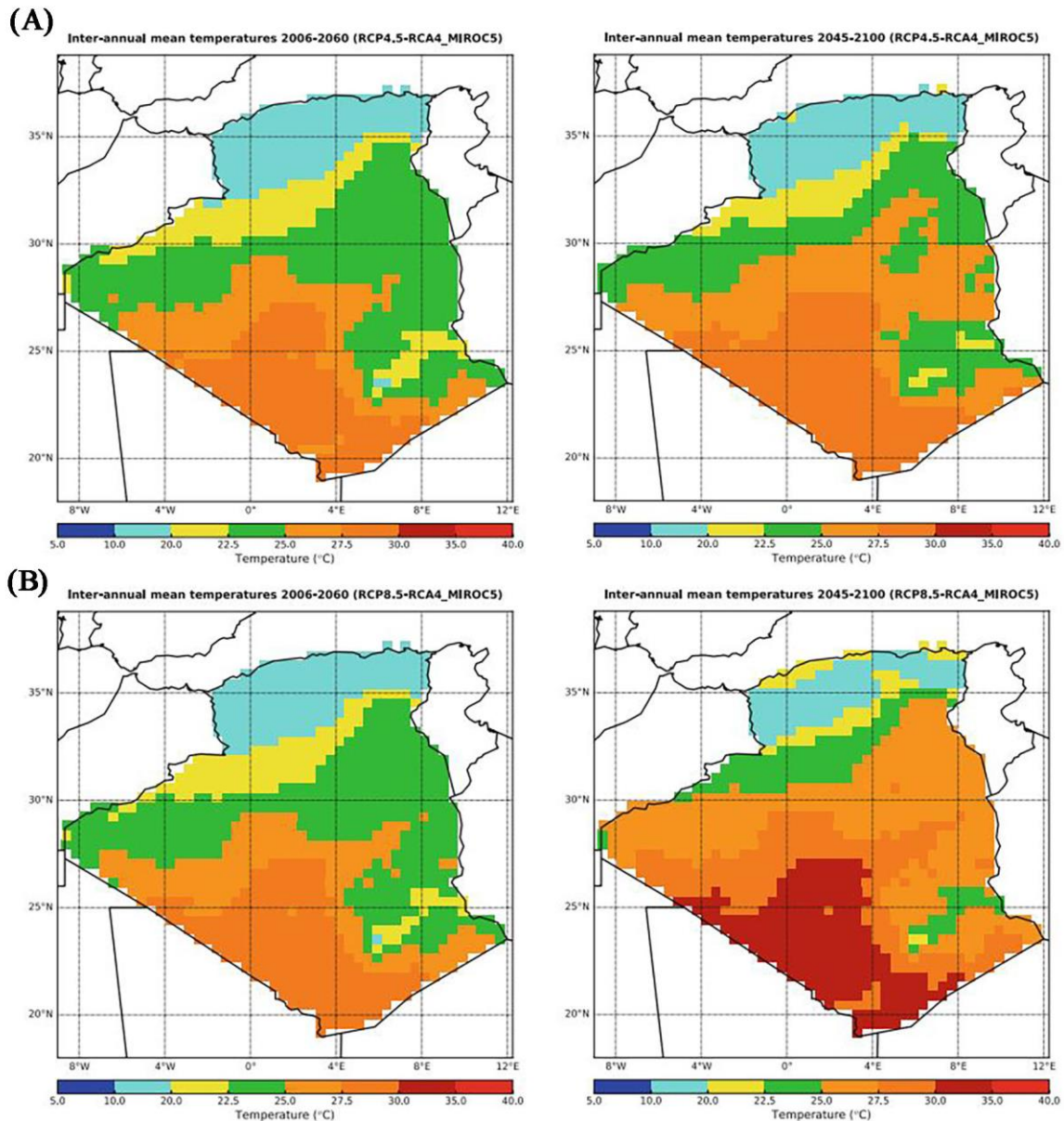


Figure 50: Températures moyennes interannuelles en Algérie sur les périodes 2006-2060 (A) et 2045-2100 (B) pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 (Zeroual et al., 2020)

Concernant les précipitations, selon Zeroual et al. (Zeroual et al., 2018) l’Algérie pourrait connaître une diminution des précipitations allant de 15 à 30%, rendant la gestion des ressources en eau plus difficile. Cela a un impact sur la disponibilité de l’eau, la désertification et la dégradation des sols. Les sécheresses prolongées peuvent affecter l’agriculture et l’élevage, entraînant des conséquences économiques et sociales.

D’après les simulations effectuées au moyen du modèle climatique RCA4-IPSL-CM5A (Figure 51), les précipitations annuelles moyennes connaîtront une réduction dans la partie Nord du pays au cours de la période 2006-2060, avec un taux allant de 0,5 à 1,5 mm/an pour le scénario RCP4.5, et de 1,5 à 2,5 mm/an pour le scénario RCP8.5. Au cours de la seconde période (2045-2100), la diminution s’avère quasiment nulle pour le scénario RCP4.5, tandis qu’elle varie de

0,5 à 1,5 mm/an pour le scénario RCP8.5. Pour ce qui est du Sud de l'Algérie, aucun changement significatif des précipitations n'est observé (Zeroual et al., 2020).

En outre, les prévisions actuelles indiquent une intensification des précipitations ponctuelles, augmentant le risque de sécheresse. Il y aura également une augmentation de la fréquence et de l'intensité des phénomènes météorologiques extrêmes, de la variabilité interannuelle estivale, des vagues de chaleur et des risques pour la santé humaine dus aux épisodes de stress thermique.

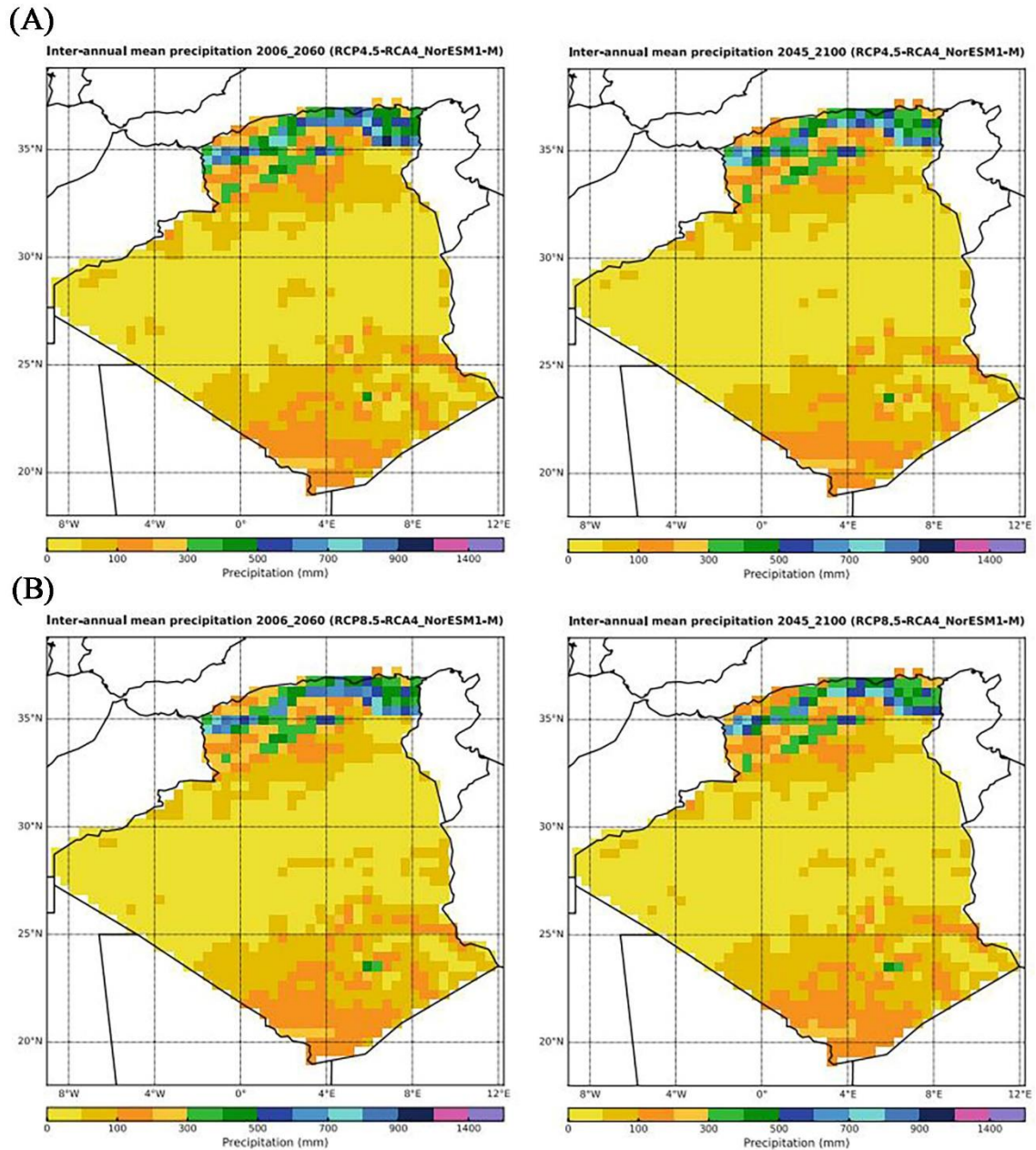


Figure 51: Précipitations moyennes interannuelles en Algérie sur les périodes 2006-2060 (A) et 2045-2100 (B) pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 (Zeroual et al., 2018)

Conclusion

Ce chapitre a examiné les caractéristiques fondamentales du climat ainsi que les mécanismes sous-jacents du changement climatique. Les preuves scientifiques accumulées indiquent de manière convaincante que la Terre connaît un réchauffement sans précédent. Les facteurs déterminants de ce changement climatique sont principalement attribuables aux activités anthropiques, qui engendrent une émission significative de gaz à effet de serre.

Les conséquences du changement climatique ont également été abordées, mettant en évidence des phénomènes tels que la montée du niveau de la mer, les événements météorologiques extrêmes et les perturbations des écosystèmes. Ces conséquences sont une source de préoccupation mondiale en raison de leur impact potentiel sur l'humanité et les écosystèmes.

Une autre partie importante de ce chapitre a porté sur la modélisation climatique et la descente d'échelle. La descente d'échelle permet d'affiner les projections climatiques à des échelles locales, en utilisant des modèles climatiques régionaux et des techniques statistiques. Cela permet une meilleure compréhension des variations régionales du climat et des impacts spécifiques du changement climatique.

Une partie du présent chapitre a discuté également des différents types des scénarios du GIEC et notamment les RCP, que nous utiliserons dans la suite de notre travail, notamment pour la simulation dans les climats futurs.

Enfin, une partie dédiée aux conséquences du changement climatique sur l'Algérie sur différents horizons futurs a été exploré mettant en évidence la nécessité de mettre en œuvre des stratégies efficaces pour atténuer ses effets et s'adapter à ses conséquences.

Chapitre II

Changement climatique et bâtiment

Le présent chapitre se concentre sur l'analyse des défis et enjeux du secteur du bâtiment face au changement climatique présent et futur.

Il examine ainsi les différentes formes d'adaptation des bâtiments aux impacts du changement climatique, ainsi que les mesures spécifiques qui peuvent être mises en œuvre dans ce cadre, mettant en lumière les mesures visant à accroître l'efficacité énergétique des bâtiments, comme mesures principales.

2.1 Typologie des impacts du changement climatique sur les bâtiments

Le changement climatique devrait engendrer des conséquences significatives sur l'environnement bâti, bien que l'étendue précise de ces conséquences reste incertaine et varie considérablement d'une région à l'autre.

Les édifices sont aujourd'hui exposés aux risques du changement climatique et des événements climatiques extrêmes, la localisation des bâtiments ayant un rôle clé dans leur vulnérabilité.

Les impacts pouvant découler de ces risques incluent une augmentation des dégâts dus aux inondations causées par l'augmentation des précipitations et la fonte du pergélisol, l'impact accru de vents plus forts et de l'intensification des cyclones et des tempêtes, l'augmentation des fissures et des mouvements du sol sur les fondations et les canalisations et un accroissement du risque d'incendies de forêt augmentant ainsi le risque d'incendie des habitations. Le secteur de la construction subira donc des impacts directs induisant des retards et des coûts accrus dus aux précipitations extrêmes, des changements dans la saison de construction, ainsi qu'une augmentation des travaux de reconstruction et de restauration en raison des phénomènes météorologiques extrêmes (Amitrano et al., 2007; Chalmers, 2014).

La Figure 52 résume les relations entre le changement climatique, le bâtiment et ses occupants

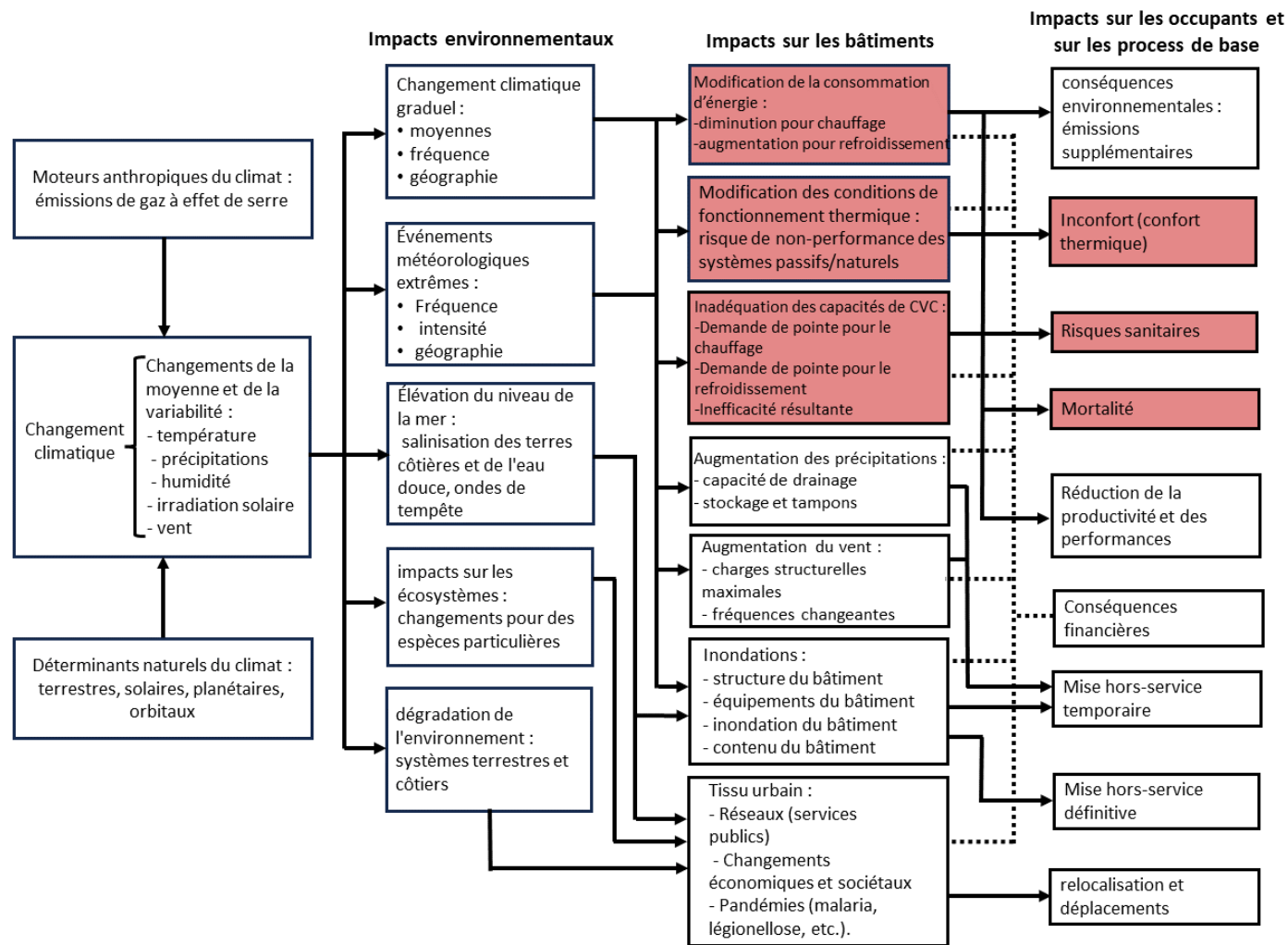


Figure 52: Représentation de la relation complexe entre le changement climatique, les bâtiments, les occupants et les process (adaptée de: de Wilde & Coley, 2012)

De plus, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur influencera la conception architecturale, nécessitant des approches différentes aussi bien pour les bâtiments existants que pour les nouvelles constructions. Ces phénomènes prévus avec un grand degré de certitude dans plusieurs régions du monde entraîneront une détérioration du confort thermique des usagers des bâtiments, une augmentation du risque sanitaire pour ces mêmes usagers ainsi qu'une augmentation importante de la demande d'énergie de climatisation, comme l'indique toutes les études analysées dans le paragraphe précédent. Ainsi, l'une des principales incidences du changement climatique est la diminution des degrés-jours de chauffage et l'augmentation des degrés-jours de refroidissement (Shi et al., 2021; Ukey & Rai, 2021) (Voir Annexe I).

Une particularité des bâtiments est leur longue durée de vie, allant de quelques décennies à plusieurs siècles (Cellura et al., 2018; de Wilde & Coley, 2012; Yau & Hasbi, 2013). Il apparaît donc important de mettre en œuvre des mesures de prévention visant à adapter le cadre bâti aux aléas climatiques afin de réduire sa vulnérabilité aux effets adverses du changement climatique (Salagnac, 2015). Ces mesures d'adaptation doivent être conjuguées à des mesures d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre du secteur du bâtiment.

2.2 La rénovation énergétique, principale approche d'adaptation des bâtiments existants au changement climatique

Ce qui suit de la présente thèse sera consacrée principalement à l'adaptation des bâtiments existants, plus particulièrement des bâtiments éducatifs, aux impacts liés à l'élévation des températures et leurs conséquences sur la demande d'énergie de refroidissement, avec comme approche principale la rénovation thermique et énergétique qui présente en sus l'avantage de co-bénéfices décrits dans le paragraphe 2.2.2 ci-dessous.

En effet, les principaux travaux scientifiques analysés au paragraphe 2.2.1 ci-dessous ont mis en évidence l'amélioration de l'efficacité énergétique (rénovation énergétique pour les bâtiments existants) comme approche principale et prioritaire d'adaptation des bâtiments aux impacts du changement climatique décrits dans le paragraphe précédent.

2.2.1 Synthèse bibliographique

Au cours des dernières décennies, de nombreuses recherches ont été menées pour évaluer l'impact du changement climatique sur les bâtiments.

Berardi et Jafarpur (Berardi & Jafarpur, 2020) ont mené une étude visant à évaluer l'impact du changement climatique sur la demande future en énergie de chauffage et de refroidissement dans la ville de Toronto (Canada). Dans cette étude, seize bâtiments prototypes de l'ASHRAE ont été utilisés comme cas d'études. Les résultats ont montré que la demande d'énergie pour le chauffage devrait diminuer en moyenne de 18 % à 33 % d'ici 2070, tandis que la demande

d'énergie pour le refroidissement devrait augmenter de 15 % à 126 % au cours de la même période.

Les résultats de plusieurs autres études ont par ailleurs établi que l'impact du changement climatique dépend fortement de la zone géographique (Asimakopoulos et al., 2012 ; Shibuya & Croxford, 2016 ; Wang & Chen, 2014 ; Jafarpur & Berardi, 2021). Par conséquent, il apparaît nécessaire de mener des investigations à l'échelle régionale pour évaluer l'impact spécifique du changement climatique sur la demande énergétique de chauffage et de refroidissement (Dolinar et al., 2010 ; Filippín et al., 2018).

Dans une étude menée en Australie, Wang et al. (Wang et al., 2010) ont évalué l'impact du changement climatique sur la demande d'énergie de chauffage et de refroidissement dans cinq zones climatiques différentes, en utilisant différentes configurations de bâtiments résidentiels et trois scénarios d'émissions de stabilisation (A1B, A1FI et 550 ppm). Les résultats indiquent qu'il y aura une augmentation significative de la demande d'énergie dans les climats dominés par les besoins de refroidissement ainsi que dans les climats équilibrés entre les besoins de chauffage et de refroidissement, par rapport aux climats dominés par les besoins de chauffage. En particulier, la ville de Sydney, qui a un climat tempéré, devrait être la plus touchée par le changement climatique, avec une augmentation attendue de la demande d'énergie allant de 112 % à 350 % d'ici 2100 par rapport aux niveaux actuels de demande d'énergie.

Il est important de noter que la région méditerranéenne est actuellement considérée comme étant très sensible aux effets du changement climatique, comme rapporté dans de nombreuses études (UNEP/MAP & Plan Bleu, 2020 ; Giorgi & Lionello, 2008). Selon les récentes prévisions d'experts, la région méditerranéenne est susceptible de connaître une augmentation significative des températures à l'avenir. Les estimations suggèrent une élévation d'environ 20% par rapport à la moyenne mondiale annuelle, avec une hausse pouvant atteindre environ 50% pendant la période chaude. (MedECC, 2020). Par conséquent, ce phénomène de réchauffement aura certainement un impact significatif sur la demande future en énergie pour le refroidissement (Giannakopoulos et al., 2009).

Une étude menée par Cellura et al. (Cellura et al., 2018) a simulé l'impact du changement climatique sur la consommation d'énergie pour le chauffage et le refroidissement dans des immeubles de bureaux situés dans quinze villes du sud de l'Europe, une région caractérisée par le climat méditerranéen. Les résultats de cette étude ont montré une augmentation de la demande annuelle en énergie allant de 50,8 % à 119,7 % d'ici 2090.

Dans ce contexte, plusieurs études ont été menées afin de proposer et d'évaluer des mesures d'adaptation au changement climatique pour les bâtiments existants (Pierangioli et al., 2017 ; Triana et al., 2018). Ainsi, Pérez-Andreu et al. (Pérez-Andreu et al., 2018) ont évalué l'efficacité de six mesures passives et deux mesures actives d'économie d'énergie en fonction de deux scénarios d'émissions, à savoir le RCP4.5 et le RCP8.5 et de deux horizons temporels, 2050 et 2100. En se basant sur des critères d'économie d'énergie, ils ont conclu que l'augmentation de l'isolation thermique et la réduction du taux de renouvellement d'air ont le plus grand impact sur la réduction de la demande énergétique.

Des simulations ont été également menées par Huang et Hwang (Huang & Hwang, 2016) à l'aide du logiciel EnergyPlus pour évaluer l'impact du changement climatique sur la consommation d'énergie de refroidissement dans un bâtiment résidentiel typique à Taiwan. Les résultats ont montré une augmentation de la demande en énergie de refroidissement, estimée à 31 %, 59 % et 82 % pour les projections futures des années 2020, 2050 et 2080, respectivement. Par la suite, cinq mesures passives ont été mises en place pour atténuer cet impact et réduire la consommation d'énergie de refroidissement. Les auteurs ont également conclu que toutes les mesures proposées sont nécessaires pour éviter toute augmentation de la demande en énergie de refroidissement.

D'autres études similaires ont été menées aux Pays-Bas par Van Hooff et al. (van Hooff et al., 2014), qui ont proposé six mesures d'adaptation passive au changement climatique visant à améliorer le confort des occupants de trois types de bâtiments résidentiels construits à des périodes différentes. Ils ont utilisé les heures de surchauffe annuelles comme indicateur de performance. Dans une autre étude, Van Hooff et al. (van Hooff et al., 2016) ont utilisé la demande d'énergie pour le chauffage et le refroidissement comme indicateur pour évaluer l'impact des mesures d'adaptation au changement climatique sur une maison mitoyenne. Les résultats de ces deux études suggèrent que parmi toutes les mesures mises en œuvre, la protection solaire extérieure et la ventilation naturelle sont les plus efficaces.

Pour leur part, Invidiata et Ghisi (Invidiata & Ghisi, 2016) ont évalué l'impact du changement climatique sur la consommation d'énergie et le confort thermique dans trois villes brésiliennes en utilisant le programme EnergyPlus. Leurs résultats ont montré que des mesures passives d'adaptation au changement climatique, telles que la protection solaire, la faible absorption solaire et l'isolation thermique, pourraient réduire la demande d'énergie de refroidissement et de chauffage de 50 % en 2080.

Une autre étude menée par Ren et al. (Ren et al., 2011) avait pour objectif d'étudier les mesures d'adaptation au changement climatique pour les bâtiments résidentiels existants et nouveaux en Australie en fonction de la demande d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre dans huit villes. En utilisant une analyse coût-efficacité, ils ont conclu que l'augmentation de l'efficacité énergétique de l'enveloppe du bâtiment est la mesure la plus efficace dans les zones où les besoins de chauffage sont prédominants. Cependant, dans les zones où les besoins de refroidissement sont prédominants et dans les zones où les besoins de chauffage et de refroidissement sont équilibrés, d'autres mesures étaient nécessaires, telles l'installation de climatiseurs et d'appareils à haut rendement énergétique, en plus de l'installation de panneaux solaires.

Dans une étude ultérieure, Nematchoua et al. (Nematchoua et al., 2019) ont évalué l'efficacité de l'isolation thermique pour l'adaptation des bâtiments hospitaliers au changement climatique dans six villes différentes de l'Océan Indien en utilisant trois paramètres : la performance thermique, la demande d'énergie et le coût énergétique, selon trois scénarios climatiques (B1, A1B et A2). Les résultats indiquent que la demande d'énergie pour le refroidissement devrait augmenter de 60,8% à 95,1% d'ici 2090, tandis que l'utilisation de l'isolation thermique pourrait réduire la demande d'énergie de refroidissement de 40% dans toutes les villes.

Parallèlement, Osman et Sevinc (Osman & Sevinc, 2019) ont mené une étude visant à évaluer plusieurs stratégies de conception de bâtiments résilients dans un climat chaud et aride pour atténuer les impacts du changement climatique dans la ville de Khartoum (Soudan). Les résultats de l'étude indiquent que d'ici 2070 le refroidissement actif deviendra nécessaire alors que la ventilation naturelle et le chauffage actif ne seront pas des stratégies de conception favorables pour toutes les saisons. L'étude a également révélé que la mesure la plus importante pour la conception de bâtiments résilients est le refroidissement par évaporation en deux étapes.

Les chercheurs Waddicor et al. (Waddicor et al., 2016) ont mené une étude pour évaluer l'impact du changement climatique et du vieillissement des bâtiments et celui des équipements sur la demande future en énergie de chauffage et de refroidissement d'une bibliothèque en Italie. Ils ont ensuite évalué l'efficacité de certaines mesures de rénovation énergétique (température de consigne d'été ; éclairage efficient ; vitrage performant ; isolation thermique ; amélioration des CoP des refroidisseurs) pour atténuer la demande en énergie. Les résultats ont montré qu'une combinaison appropriée de mesures pouvait réduire la demande en énergie de refroidissement de 87,3 % dans les conditions futures.

Pajek et Košir (Pajek & Košir, 2021) ont mené une étude pour évaluer l'efficacité de mesures de conception passive pour la consommation d'énergie de chauffage et de refroidissement dans les bâtiments résidentiels sous les climats les plus typiques d'Europe. Ils ont constaté que la réduction du ratio surfacique fenêtre/étage était la mesure globale la plus efficace pour réduire les effets du changement climatique. L'étude a également mis en évidence que l'utilisation de mesures passives ne permet pas de contrer complètement l'impact du changement climatique sur la demande énergétique des bâtiments, mais peut néanmoins conduire à une faible consommation d'énergie, en particulier dans les climats chauds, tempérés et océaniques.

Dans une étude menée au Royaume-Uni, Porritt et al. (Porritt et al., 2011) ont examiné les effets d'un ensemble de mesures passives sur la réduction de la surchauffe dans les bâtiments résidentiels d'ici 2080. Les chercheurs ont constaté que les stratégies d'isolation des parois, qui visent à réduire les gains de chaleur solaire, telles que l'utilisation de volets extérieurs et le revêtement des parois extérieures de couleurs claires, pourraient être les mesures les plus efficaces pour minimiser la surchauffe.

Enfin, Nik et Kalagasidis (Nik & Sasic Kalagasidis, 2013) ont mené, pour la ville de Stockholm en Suède, une analyse de sensibilité des performances énergétiques du parc de logements aux incertitudes climatiques (modèles, scénarios, ...), ainsi qu'une évaluation de trois stratégies de refroidissement des bâtiments, à savoir, un refroidissement naturel, naturel et mécanique (mode hybride) et uniquement mécanique. Dans le dernier cas qui nous intéresse, ils ont constaté que le refroidissement naturel pourrait être une stratégie efficace pour atténuer la croissance de la demande d'énergie de refroidissement et prévenir les surchauffes dans les conditions climatiques futures.

2.2.2 Les co-bénéfices de la rénovation thermique et énergétique des bâtiments

La rénovation thermique et énergétique des bâtiments peut être considérée comme une action d'adaptation avec des co-bénéfices d'atténuation et vice-versa.

En effet, comme illustré dans le Tableau 8, elle permet de répondre simultanément aux enjeux d'adaptation des bâtiments et d'atténuation de leurs émissions de GES, notamment en améliorant le confort thermique des usagers, en réduisant les risques sanitaires liés aux périodes de canicules et de froid extrême ainsi qu'en renforçant l'équité sociale des logements destinés aux populations vulnérables. Tout en réduisant les besoins énergétiques

Tableau 8: Les co-bénéfices de la rénovation thermique et énergétique des bâtiments

Mesures de rénovation thermique et énergétique des bâtiments résidentiels et tertiaires	
Bénéfices d'Adaptation	Bénéfices d'Atténuation
<p>Amélioration du confort thermique des utilisateurs ;</p> <p>Réduction des risques sanitaires et de la vulnérabilité des habitants et des utilisateurs pendant les périodes de canicule et de froid extrême ;</p> <p>Renforcement de l'équité sociale des utilisateurs les plus vulnérables par la réduction de leurs besoins énergétiques.</p>	<p>Réduction des besoins énergétiques ;</p> <p>Réduction des émissions de GES.</p>

2.2.3 Le confort thermique

Le confort thermique est une perception de satisfaction physique résultant de la conjonction de divers paramètres et de facteurs qui sont liés à l'environnement bâti, au climat et au comportement des occupants. Cette notion est actuellement au cœur de recherches étendues en raison de son importance et de sa complexité interdisciplinaire, conduisant à l'émergence de multiples méthodes d'investigation et d'évaluation. La qualité de l'environnement thermique ressenti à l'intérieur d'un espace influence les actions régulatrices des occupants. En cas d'inconfort thermique, ces derniers ont tendance à recourir à des dispositifs mécaniques de chauffage et de refroidissement, entraînant une augmentation de la consommation énergétique, une utilisation non durable des ressources non renouvelables et une détérioration irréversible de l'environnement.

La littérature comprend plusieurs études qui apportent des éclaircissements sur cette notion. Selon Givoni (Givoni, 1978), le confort thermique ne peut être atteint que lorsque les mécanismes d'autorégulation du corps humain sont minimisés. D'une manière plus simplifiée, Fanger considère que le confort thermique équivaut à l'absence d'inconfort. D'après Liébard et

De Herde (Liébard & De Herde, 2005), le confort thermique est défini comme « *un état de satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique. Il est déterminé par l'équilibre dynamique établi par échange thermique entre le corps et son environnement* ».

Le maintien de la température corporelle à sa valeur normale d'environ 37°C nécessite une dissipation continue de la chaleur excédentaire produite par l'organisme en fonction de ses activités. Cette dissipation se réalise selon les mécanismes suivants :

- Le rayonnement (échange de chaleur avec les surfaces environnantes)
- La convection (échange de chaleur avec l'air ambiant)
- L'évaporation (évaporation de l'eau à partir de la surface corporelle)
- La conduction (transfert de chaleur par contact direct avec des surfaces, notamment les pieds en contact avec le sol).

2.2.3.1 Les facteurs influant sur le confort thermique

Le confort thermique humain est essentiellement influencé par six facteurs d'origine physiologique, comportementale et environnementale, qui sont associés à l'individu et à son environnement. Ces paramètres comprennent le métabolisme, les choix vestimentaires, la température ambiante de l'air, la température des surfaces environnantes, le taux d'humidité relative et la vitesse du flux d'air (Figure 53).

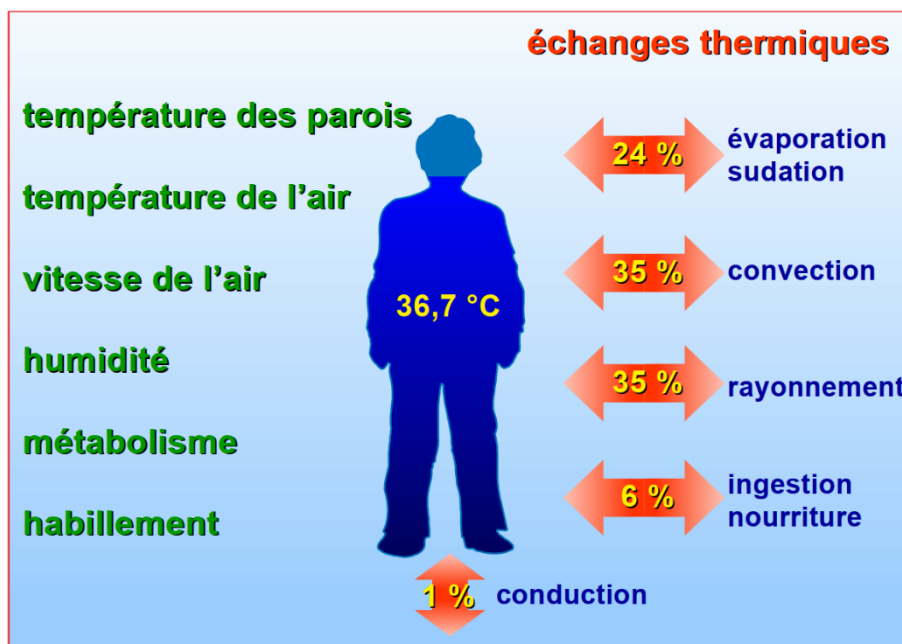


Figure 53: Les facteurs influant sur le confort thermique (Liébard & De Herde, 2005)

▪ Le métabolisme

Le métabolisme désigne la production de chaleur interne du corps humain pour maintenir sa température corporelle constante à environ 36,8°C. Le métabolisme de base, qui équivaut à l'effort énergétique minimal d'une personne au repos et en bonne santé, est d'environ 46 W/m².

Le métabolisme de travail, quant à lui, s'ajoute au métabolisme de base pour compenser la production de chaleur supplémentaire due à l'activité physique, comme expliqué dans le Tableau 9.

Tableau 9: L'effet de l'activité sur les niveaux de métabolisme (Fabbri, 2015)

Activité	Effort énergétique (W/m ²)	Valeur du métabolisme (met*)
Repos, couché (métabolisme de base)	46	0,8
Repos, assis	58	1,0
Activité légère, assis (bureau, domicile, école, laboratoire)	70	1,2
Activité légère, debout (vendeur, laboratoire, petite industrie)	93	1,6
Activité moyenne, debout (vendeur, travail ménager, travail sur machine)	116	2,0
Marche à plat à 2 km/h	110	1,9
Marche à plat à 3 km/h	140	2,4
Marche à plat à 4 km/h	165	2,8
Marche à plat à 5 km/h	200	3,4

* 1 met équivaut à un effort énergétique de 58,15 W/m²

- ***L'habillement***

L'habillement correspond à une résistance thermique aux transferts de chaleur qui se produisent entre la surface cutanée et l'environnement. Il est mesuré en "Clo" où 1 Clo = 0,155 °C.m²/ W.

- ***La température ambiante***

La température ambiante est essentielle car plus de 50% des pertes de chaleur du corps humain résultent de la convection et de l'évaporation avec l'air ambiant (Liébard & De Herde, 2005). Cette exigence est sujette à des variations en fonction des individus et de la nature des activités en cours. Selon l'étude menée par Denker et al. (Denker et al., 2014) une température ambiante avoisinant les 20°C est considérée comme souhaitable durant la saison hivernale, tandis qu'en été, une plage de confort thermique visée se situe entre 24°C et 27°C.

- ***La température des parois***

La température de surface des parois, ou température moyenne de rayonnement, est une moyenne pondérée des températures des surfaces délimitant l'environnement étudié, influençant les pertes de chaleur par rayonnement et par convection.

La température ambiante de l'air et la température des parois sont utilisées pour calculer la température (opérative) de confort ressentie (Figure 54), appelée aussi température résultante sèche selon la l'équation suivante :

$$T_{rs} = (T_a + T_p) / 2 \quad (1)$$

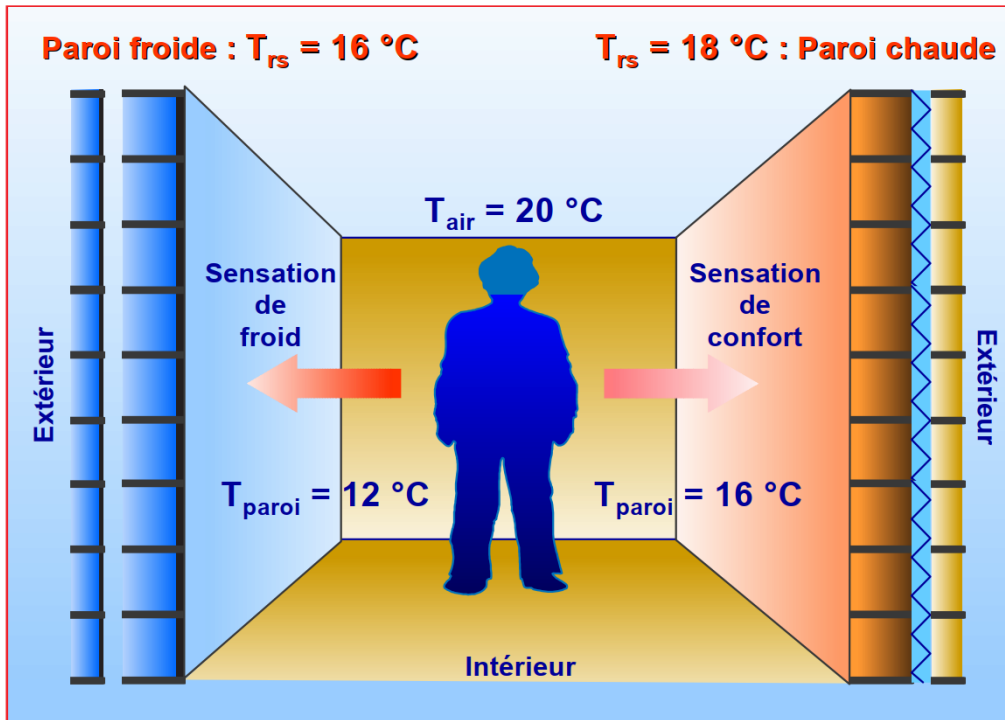


Figure 54: L'impact de la température de l'air et des parois sur la température de confort (Liébard & De Herde, 2005)

- *L'humidité relative*

L'humidité relative de l'air, exprimée en pourcentage, représente la quantité d'eau présente dans l'air à une certaine température ambiante par rapport à la quantité maximale d'eau que cet air peut contenir à la même température. Ce paramètre a un impact sur le confort thermique car il affecte les échanges de chaleur par évaporation à la surface de la peau. Dans la plage de 30% à 70% d'humidité relative, il a peu d'effet sur la perception du confort thermique (Liébard & De Herde, 2005). Cependant, une humidité trop basse peut entraîner une irritation des muqueuses et une augmentation du risque des maladies respiratoires (Denker et al., 2014).

- *La vitesse de l'air*

La vitesse de l'air, en particulier la vitesse relative de l'air par rapport à l'individu, doit être prise en compte car elle affecte les échanges de chaleur par convection et favorise l'évaporation de la transpiration à la surface de la peau (Liébard & De Herde, 2005).

À l'intérieur des bâtiments, il est généralement considéré que tant que la vitesse de l'air ne dépasse pas 0,2 m/s, son impact sur le confort des occupants est négligeable (Jedidi & Benjeddou, 2016).

Ainsi, la zone de confort thermique peut être représentée dans des diagrammes (abaques) en fonction des deux principales variables, à savoir la température de l'air et l'humidité relative (Figure 55).

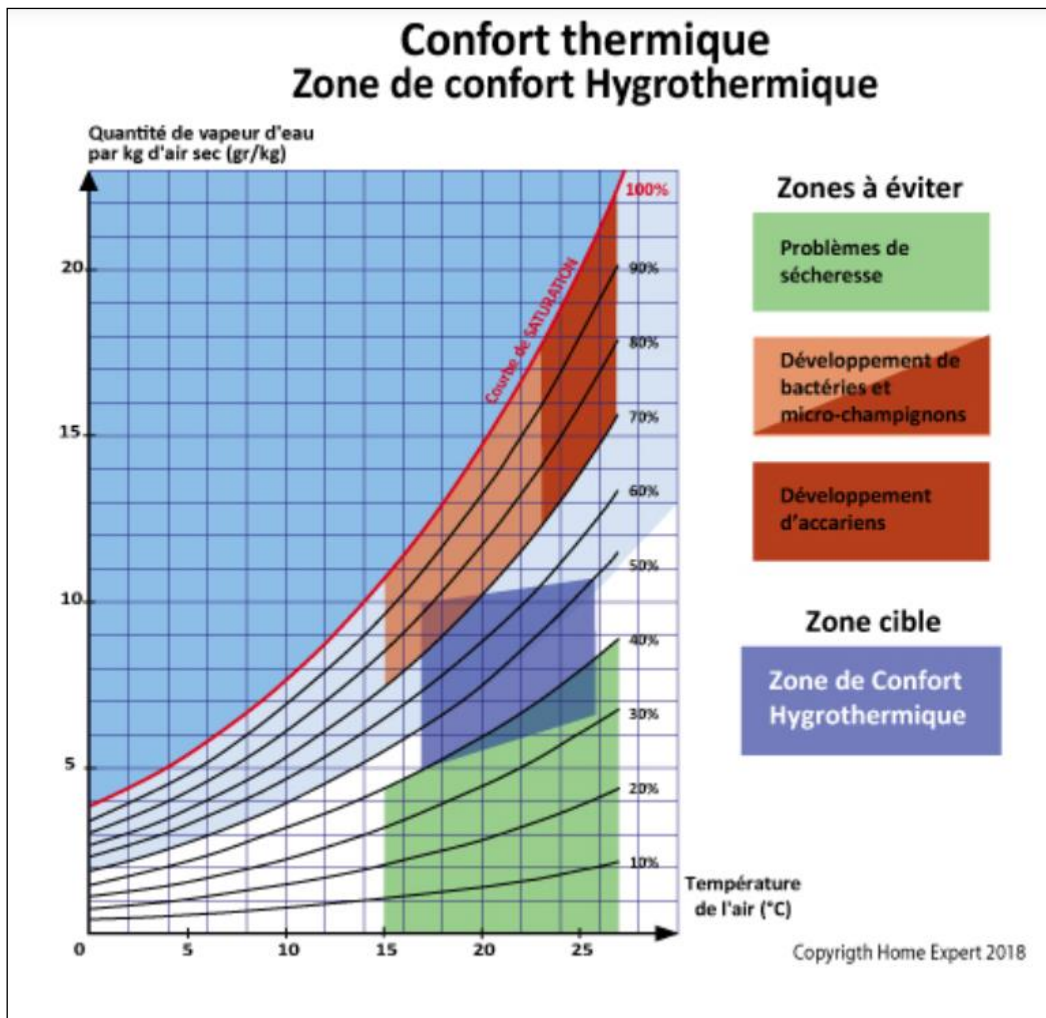


Figure 55: Diagramme de représentation de la zone de confort hygrothermique (Home Expert, 2022)

2.2.3.2 Relation entre climat et confort thermique

Une conception de bâtiment réussie se traduit par des relations harmonieuses entre les occupants, les diverses composantes du bâtiment et l'environnement. L'intégration du contexte climatique dès la phase de conception a un impact direct sur le fonctionnement du bâtiment, notamment sur ses performances thermiques. Ces performances, à leur tour, influencent le comportement thermique des occupants, leurs actions et leur niveau de confort.

La Figure 56 présente la variation des températures au cours de l'année dans deux bâtiments, l'un présentant une adaptation insuffisante et l'autre étant correctement adapté, dans des conditions naturelles, c'est-à-dire sans chauffage ni climatisation.

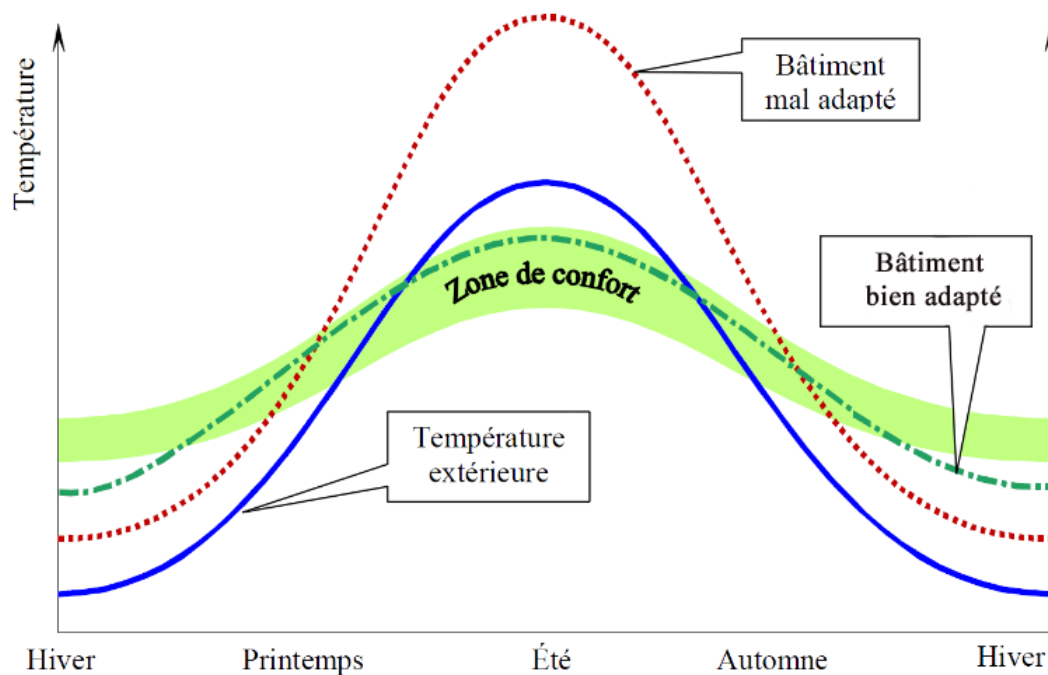


Figure 56: Évolution libre de la température intérieure dans deux bâtiments de niveaux d'adaptation au climat différents (Roulet, 2004)

Le bâtiment insuffisamment adapté connaît une augmentation significative de la température pendant la saison chaude, tandis que des températures très basses sont enregistrées pendant la saison froide. En revanche, le bâtiment correctement adapté maintient des températures confortables à l'intérieur de la plage de confort thermique tout au long de l'année. Comme le souligne l'auteur de l'étude (Roulet, 2004), un bâtiment bien adapté offre naturellement un confort thermique, tandis que l'autre nécessite d'importantes installations pour maintenir des conditions thermiques acceptables.

2.3 Typologie des mesures de rénovation thermique et énergétique des bâtiments existants

L'analyse bibliographique présentée au paragraphe 2.2.1 ci-dessus nous a permis de recenser les principales mesures de rénovation thermique et énergétique des bâtiments décrites ci-dessous et dont l'efficacité fera l'objet d'une évaluation dans les chapitres suivants.

Ces mesures se rapportent à l'isolation thermique et l'étanchéité de l'enveloppe extérieure du bâtiment, aux performances thermiques des vitrages, à la ventilation et aux dispositifs d'ombrage.

2.3.1 Isolation thermique

Le principal rôle de l'isolation thermique est de réduire la transmission du flux de chaleur qui traverse l'enveloppe extérieure. Pendant la saison hivernale, le flux de chaleur se déplace de l'environnement intérieur plus chaud vers l'environnement extérieur plus froid. En revanche, en été, le sens du flux de chaleur est inversé.

Les déperditions thermiques à travers les différents éléments du bâtiment, ainsi que leurs taux respectifs, sont illustrées dans la Figure 57.

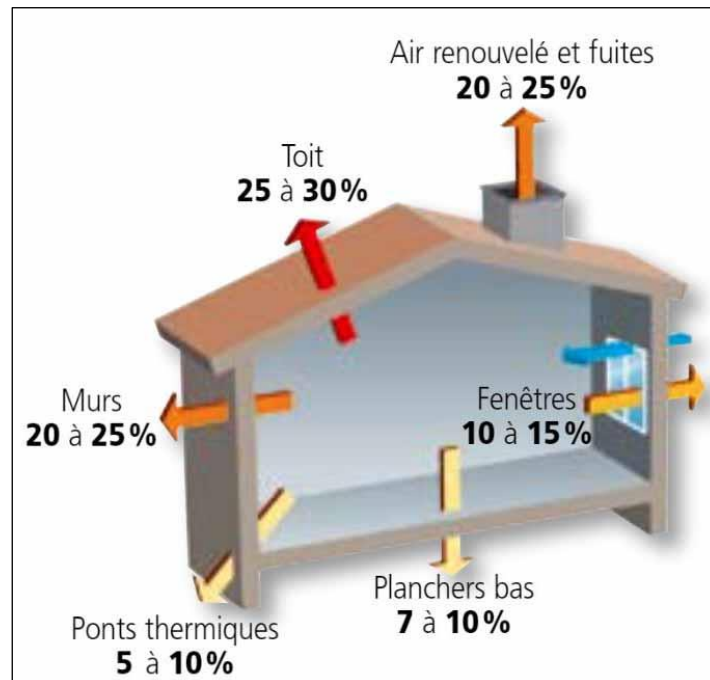


Figure 57: Déperditions thermiques à travers l'enveloppe du bâtiment (ADEME , 2008)

Ainsi la seule isolation thermique rapportée aux différentes parois du bâtiment permettrait de réduire significativement, en fonction des types et modes d'isolation utilisés, une majeure partie des déperditions thermiques de ce dernier.

On distingue généralement trois types d'isolants, présentant des performances thermiques et des coûts différents :

- Les isolants synthétiques tels que le polystyrène et le polyuréthane ;
- Les isolants minéraux comme la laine de verre et la laine de roche ;
- Les isolants à base de matériaux biosourcés tels que le liège, la paille, la laine de mouton et la fibre de bois.

Les modes d'isolation présentent également des efficacités différentes :

i. *Isolation thermique intérieure*

Ce type d'isolation consiste à poser l'isolant du côté intérieur de la paroi. Cette méthode est facile à mettre en œuvre. Cependant, elle réduit la surface habitable et nécessite un traitement supplémentaire pour les ponts thermiques.

ii. *Isolation thermique extérieure*

Cette technique d'isolation consiste à poser l'isolant du côté extérieur de la paroi. Elle permet d'éliminer les ponts thermiques sans traitement supplémentaire. Néanmoins, elle est difficile à mettre en place, surtout dans les bâtiments de grande hauteur, voire impossible dans d'autres cas (certains bâtiments historiques, bâtiments à ornements complexes sur la façade, etc.). De plus, elle nécessite une protection contre les intempéries.

iii. *Isolation thermique intégrée*

Cette méthode d'isolation implique l'utilisation d'isolants incorporés directement au sein du matériau de la paroi lui-même. Cela peut être réalisé en utilisant des matériaux de construction dotés de propriétés isolantes intrinsèques (comme le béton cellulaire, le béton de chanvre) ou en intégrant un isolant entre les différentes couches de parois par des techniques d'agglomération ou d'injection (comme le polyuréthane, le polystyrène, etc.).

L'isolation par l'extérieur est généralement préférée lorsqu'elle est envisageable, car elle offre plusieurs avantages :

- Elle permet de conserver la superficie intérieure.
- Elle supprime les ponts thermiques.
- Elle préserve l'inertie thermique de la paroi : l'inertie de la paroi lui permet de stocker de la chaleur et de la restituer petit à petit. Elle permet de limiter les effets d'une variation rapide de la température extérieure sur le climat intérieur grâce à un déphasage entre la température extérieure et la température de surface intérieure des murs, tout en amortissant l'amplitude de cette variation (Energie Plus Le Site, 2007a) (Figure 58).

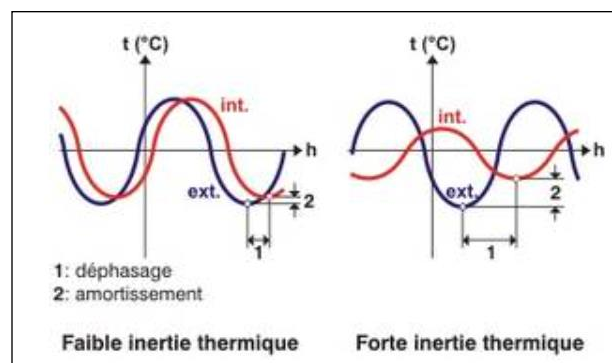


Figure 58: Variations des températures quotidiennes d'un logement en fonction de son inertie thermique (Energie Plus Le Site, 2007a)

La performance thermique des isolants est caractérisée par leur conductivité thermique (λ) exprimée en W/m.K.

Le degré d'isolation thermique d'une paroi est caractérisé par sa résistance thermique (R_T), exprimée en ($m^2.K/W$). Elle est la somme des résistances thermiques de toutes les couches constituant la paroi (matériau ou air), en plus des résistances superficielles intérieures (R_i) et extérieures (R_e) (équation 2 et Figure 59) (Energie Plus Le Site, 2007a) :

$$R_T = R_i + R_1 + R_{\dots} + R_X + R_a + R_{X+1} + R_e \quad (2)$$

Selon la réglementation thermique algérienne, notamment le document technique réglementaire DTR C3.2 et C3.4 (CNERIB, 2016), la résistance thermique d'une couche de lame d'air est obtenue à partir du Tableau 10.

Tableau 10: Résistance thermique d'une lame d'air ($m^2.K/W$) (CNERIB, 2016).

Position de la lame d'air	Sens du flux de chaleur	Épaisseur de la lame d'air (mm)						
		5 à 7	8 à 9	10 à 11	12 à 13	14 à 24	25 à 50	55 à 300
Verticale		0,11	0,13	0,14	0,15	0,16	0,16	0,16

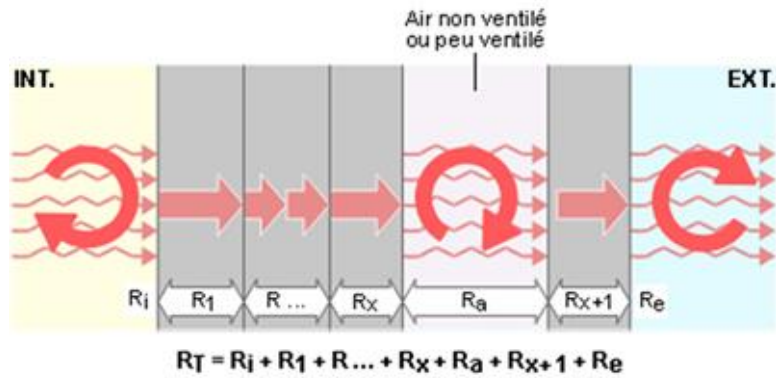


Figure 59: Résistance thermique totale d'une paroi (Energie Plus Le Site, 2007b)

La résistance thermique totale est utilisée pour calculer le coefficient de transmission thermique (U) de la paroi, exprimé en ($W/m^2.K$) (Équation 3) :

$$U = 1/R_T \quad (3)$$

2.3.2 Performances thermiques des fenêtres

Les fenêtres jouent plusieurs rôles essentiels au sein d'un bâtiment. Elles assurent la ventilation naturelle, éclairent les espaces intérieurs et sont un élément clé des systèmes de chauffage passif en captant l'énergie solaire. Elles sont également le siège de déperditions thermiques, plus ou moins importantes selon le degré de leurs performances thermiques.

Plusieurs paramètres définissent les performances des fenêtres (Figure 60) : le coefficient de transmission thermique de la fenêtre dans son ensemble " U_w ", le coefficient de transmission thermique du vitrage (U_g) et le coefficient de transmission thermique du châssis (vantail + cadre) (U_F).

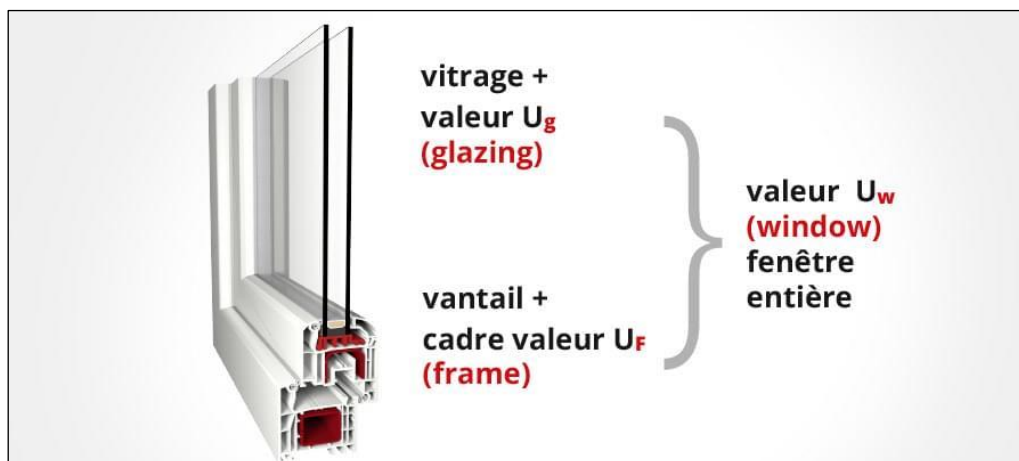


Figure 60: Propriétés thermiques des fenêtres (fenetre24.be, 2023)

Le coefficient de transmission thermique U_w de la fenêtre est influencé par le coefficient de transmission thermique du châssis (U_F), le coefficient de transmission thermique du vitrage (U_g), ainsi que la qualité des assemblages entre ces composantes.

D'autres paramètres influencent la performance thermique des fenêtres (Figure 61) :

- le coefficient de gain de chaleur solaire (CGCS) qui représente la fraction du rayonnement solaire qui traverse le vitrage par rapport au rayonnement solaire incident. Cette valeur varie entre 0 et 1. Une valeur proche de 1 indique une transmission importante de chaleur à travers le vitrage.
- le coefficient de transmission lumineuse (TL) indique le pourcentage de lumière solaire qui passe à travers le vitrage. Cette valeur aussi se situe entre 0 et 1. Un TL bas signifie une réduction de la pénétration de la lumière.

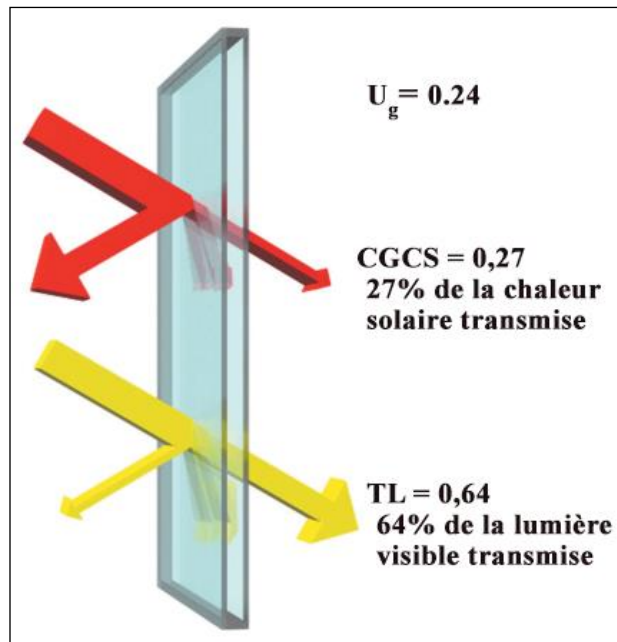


Figure 61: Caractéristiques optiques et thermiques d'un double vitrage rempli de gaz argon (adapté de Kibert, 2016)

Différents types de vitrage sont disponibles, dont :

i. Simple vitrage

Composés d'une unique vitre, les vitrages simples présentent des propriétés thermiques médiocres et démontrent une efficacité limitée dans l'atténuation du transfert de chaleur ou de l'entrée de la lumière solaire.

ii. Double vitrage

Composé de deux panneaux de verre séparés par une lame d'air ou de gaz. Les vitrages doubles ont des performances thermiques supérieures aux vitrages simples et bloquent mieux la chaleur et la lumière solaire.

iii. Triple vitrage

Composé de trois couches de verre vitres séparées par deux lames d'air ou de gaz, le triple vitrage offre une excellente performance en termes d'isolation thermique. Cependant, il réduit considérablement l'apport solaire pendant les périodes hivernales. Son utilisation doit donc être minutieusement étudiée.

2.3.3 Étanchéité à l'air de l'enveloppe extérieure

Un bâtiment à haute performance énergétique doit répondre à des critères d'isolation thermique de l'enveloppe, de protection solaire et également garantir une étanchéité à l'air efficace.

L'étanchéité à l'air d'un bâtiment vise à éliminer toute infiltration d'air non désirée à l'intérieur. Ces infiltrations sont généralement provoquées par le vent ou par des différences de pression résultant des variations de température entre l'intérieur et l'extérieur de l'enveloppe du bâtiment. Ces fuites d'air se produisent aux jonctions entre les éléments de construction (parois et

plafonds, parois et planchers), à travers les ouvertures (portes et fenêtres), les éléments passant à travers l'enveloppe (comme les cheminées et les gaines d'aération) ainsi que les infrastructures électriques et de réseau (eau, gaz, etc.).

L'étanchéité à l'air du bâtiment présente plusieurs avantages :

- Elle réduit la consommation d'énergie en minimisant les déperditions thermiques.
- Elle préserve la durabilité du bâtiment en limitant les risques de condensation causés par les infiltrations d'air, ce qui peut endommager les éléments de construction.
- Elle améliore le confort en réduisant les courants d'air indésirables, atténuant les bruits extérieurs et limitant les odeurs désagréables.

L'étanchéité à l'air d'un bâtiment ou d'une zone de bâtiment est généralement mesurée par le taux horaire de renouvellement d'air, selon différentes approches :

- L'infiltration est définie comme le débit par unité de surface exposée ($\text{m}^3/\text{h}.\text{m}^2$), lorsque la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur est de 50 Pa. Cette approche est couramment utilisée au Royaume-Uni ;
- L'infiltration est définie comme le débit par unité de surface exposée ($\text{m}^3/\text{h}.\text{m}^2$), lorsque la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur est de 4 Pa, correspondant à la norme I4Q4 (Effinergie, 2009) couramment utilisée en France et en Belgique ;
- L'infiltration est définie comme le taux horaire de renouvellement du volume d'air du bâtiment ou de la zone de bâtiment dans des conditions normales de pression. L'unité est exprimée en ACH (*Air Changes per Hour*) ;
- l'infiltration est définie comme le taux horaire de renouvellement du volume d'air du bâtiment ou de la zone de bâtiment à une différence de pression de 50 Pa entre l'intérieur et l'extérieur est de 50 Pa, équivalant à un vent de 30 km/h et correspondant à la norme N₅₀ (Effinergie, 2009). L'unité est exprimée en ACH₅₀ (*Air Changes per Hour at 50 Pa*) ;

Pour prévenir les problèmes d'infiltration, il convient de procéder à des installations de haute qualité. Plusieurs produits et techniques existent pour minimiser les infiltrations d'air et augmenter l'étanchéité de l'enveloppe de bâtiment. Les Figures 62, 63 et 64 en donnent quelques exemples.



Figure 62: Membrane d'étanchéité (Projet Vert, 2021)



Figure 63: Une Arrivée traversant la membrane d'étanchéité pour le passage des réseaux (Projet Vert, 2021)



Figure 64: Étanchéité de menuiserie extérieure (Projet Vert, 2021)

2.3.4 Ventilation naturelle

La ventilation naturelle fait référence au mouvement d'air entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment. Cette circulation d'air est déclenchée par des différences de pression causées par le vent et les variations de densité de l'air entre l'intérieur et l'extérieur (Energie Plus Le Site, 2007c).

La ventilation naturelle remplit diverses fonctions. Elle assure la qualité de l'air intérieur en introduisant de l'air frais et en évacuant l'air vicié chargé de polluants divers tels que les odeurs, l'humidité, la fumée et les composés volatils. De plus, la ventilation naturelle contribue au maintien du confort thermique, notamment pendant les saisons chaudes. Elle évacue l'air chaud de l'intérieur et le remplace par de l'air frais extérieur (sous réserve que la température extérieure soit inférieure à la température intérieure). Pour cela, une surventilation nocturne pendant l'été permet de libérer la chaleur emmagasinée dans la masse thermique de l'enveloppe et d'accumuler de l'air frais qui sera libéré pendant la journée.

Étant totalement naturelle et sans intervention mécanique, ce type de ventilation permet d'économiser de l'énergie comparé à un système de ventilation ou de refroidissement mécanique. Cela contribue à réduire les émissions de CO₂ et ainsi minimiser l'impact écologique du bâtiment. De plus, la ventilation naturelle est plus économique en termes d'installation et d'entretien que la ventilation mécanique.

La ventilation naturelle résulte d'une différence de pression générée par des mécanismes physiques engendrés par les interactions entre les charges, les conditions météorologiques telles que le vent et la température, ainsi que le bâtiment lui-même. Les principaux moteurs de la ventilation naturelle sont :

- **Le vent**

Lorsque le vent interagit avec les façades du bâtiment, il crée différentes pressions en fonction de sa direction et de l'orientation spécifique de chaque façade. Les façades perpendiculaires à la direction du vent subissent une augmentation significative de la pression (pression positive), tandis que les façades abritées du vent connaissent une réduction de la pression (pression négative). La Figure 65 illustre la circulation du vent autour d'un bâtiment.

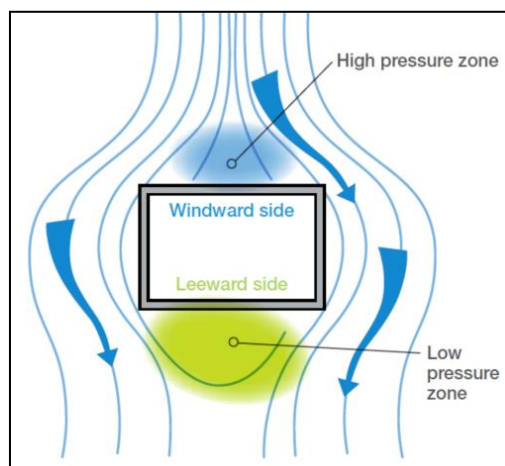


Figure 65: La circulation du vent autour d'un bâtiment (Hui., 2016)

La pression exercée par le vent sur une surface dépend de paramètres tels que la vitesse et la direction du vent, ainsi que des caractéristiques du bâtiment comme sa forme architecturale, son emplacement et son environnement immédiat (Hui., 2016).

À l'intérieur du bâtiment, une zone de pression négative se forme en raison de la différence de pression entre ses deux côtés. L'air se déplace des zones de haute pression (pression positive) vers les zones de basse pression, créant ainsi un flux d'air interne.

▪ **La température de l'air**

La température de l'air affecte sa densité conformément à la loi des gaz parfaits. L'air froid possède une densité plus élevée que l'air chaud en raison de la variation de la masse volumique liée à la température. Cette différence de densité génère une disparité de pression entre les couches d'air froid et chaud à l'intérieur d'un volume donné.

Lorsqu'une différence de température se manifeste entre l'air chaud à l'intérieur et l'air frais à l'extérieur d'un espace, un phénomène de convection naturelle se produit. Les ouvertures situées dans la partie supérieure du volume favorisent le mouvement ascendant de l'air chaud moins dense, tandis que les ouvertures inférieures permettent l'entrée de l'air froid plus dense venant de l'extérieur. Ce mécanisme de convection assure un échange continu d'air, contribuant ainsi à la régulation thermique et à la qualité de l'air à l'intérieur de l'espace (voir Figure 66).

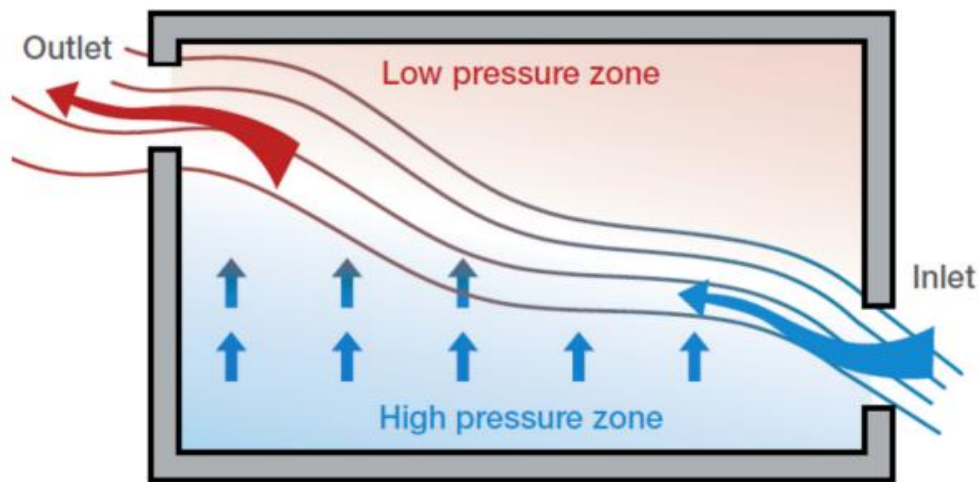


Figure 66: Ventilation par différence de température (Hui., 2016)

Les pressions de deux volumes d'air à différentes températures seront distinctes si ces volumes sont superposés et séparés par une barrière. Lorsque des ouvertures sont positionnées au niveau de cette séparation, un courant d'air vertical se forme. Celui-ci entraîne la montée de l'air chaud vers la partie supérieure tout en introduisant de l'air frais depuis la partie inférieure (voir Figure 67). Ce phénomène est connu sous le nom d'effet de cheminée ou tirage thermique. La différence de pression entre les côtés du courant d'air est influencée par la variation de température ainsi que par la hauteur au-dessus du niveau de référence.

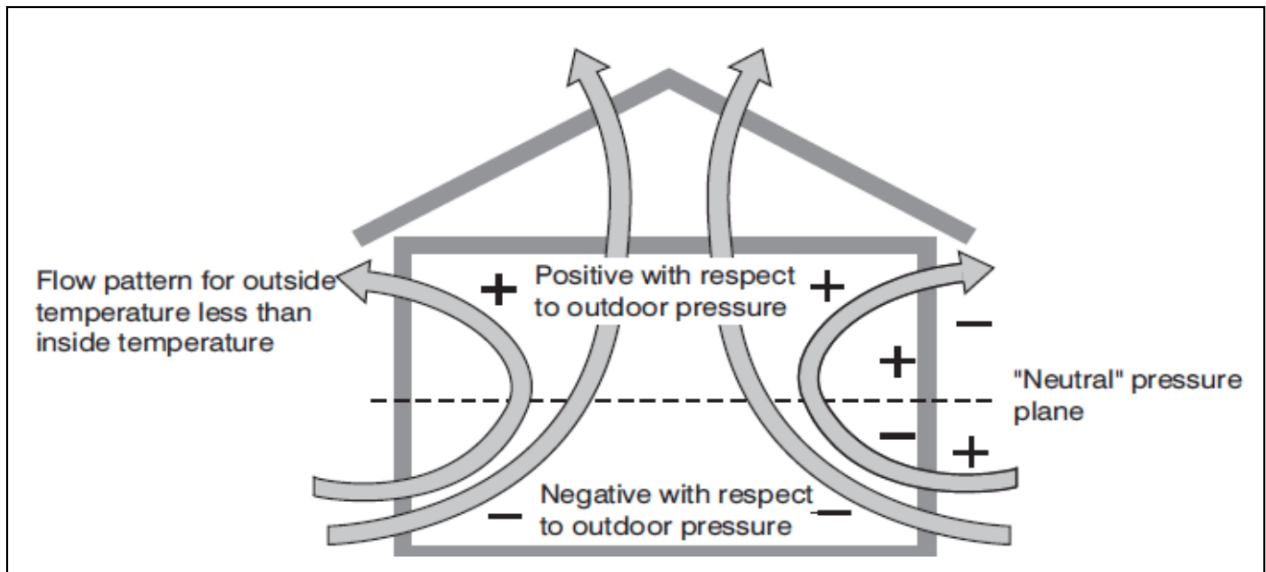


Figure 67: Effet du tirage thermique dans les bâtiments (Khatami, 2014)

▪ Effet combiné du vent et de la différence de température

Dans la pratique, le vent et la différence de température (effet de tirage thermique) agissent ensemble pour générer un mouvement d'air à l'intérieur des bâtiments.

Ces deux forces, en fonction de la direction du vent et de la disparité de température entre l'intérieur et l'extérieur, peuvent se combiner lorsque leurs directions concordent. Cette combinaison peut entraîner une augmentation d'environ 40 % du déplacement de l'air par rapport à l'effet de chaque influence prise individuellement. Cependant, elles peuvent également s'opposer si leurs directions sont opposées. Dans ce cas, des forces égales et contraires peuvent potentiellement annuler complètement le mouvement d'air.

La Figure 68 illustre comment le vent et les différences de pression influencent une paroi.

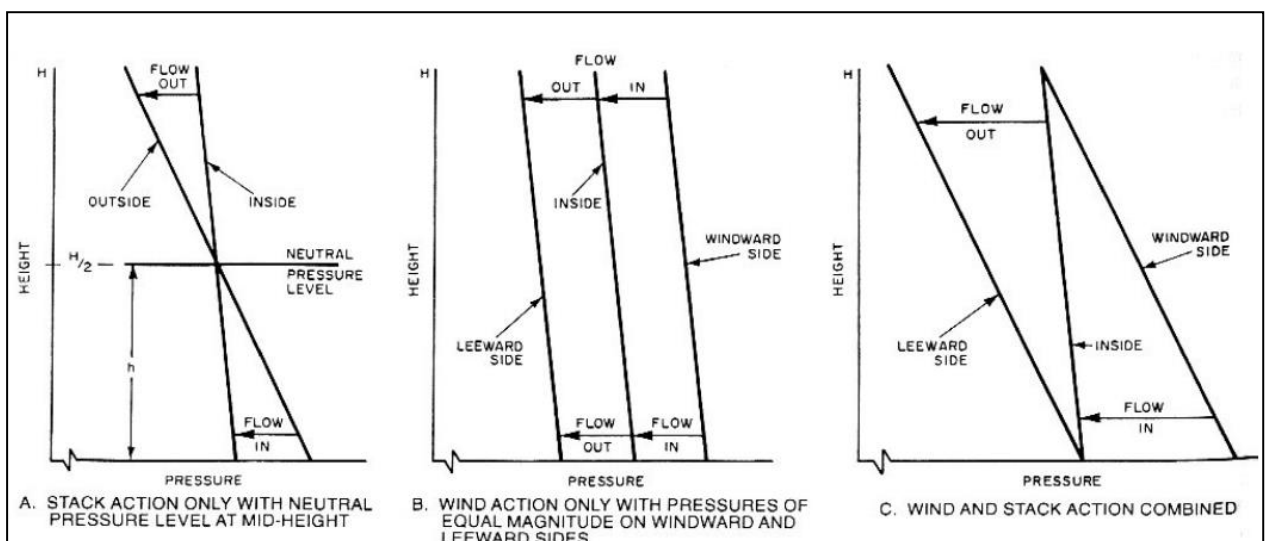


Figure 68: Effet combiné du vent de la différence de pression (Hui., 2016)

2.3.5 Ventilation mécanique

La ventilation mécanique permet de créer une différence de pression à l'aide de la pression dynamique d'un ventilateur. Il existe quatre principaux types de ventilation mécanique :

2.3.5.1 Systèmes de ventilation par extraction

Les dispositifs de ventilation par aspiration opèrent en induisant une dépression au sein du bâtiment. En réduisant la pression de l'air à l'intérieur en dessous de celle de l'air extérieur, de l'air extérieur est aspiré à l'intérieur par le biais des fuites dans les parois et les fenêtres, ou par le biais des ouvertures spécialement conçues dans l'enveloppe extérieure (voir Figure 69).

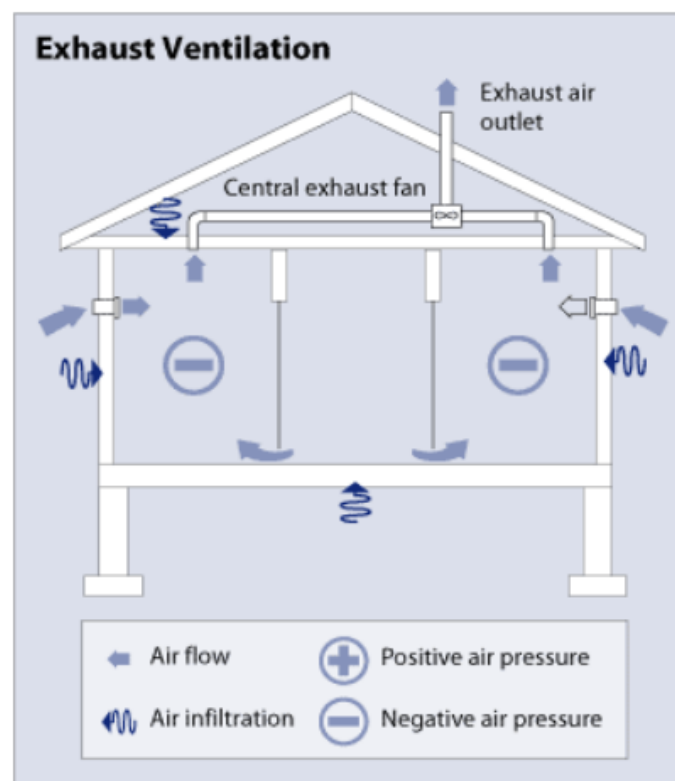


Figure 69: Ventilation par extraction d'air (Energy saver, n.d.)

Le système de ventilation par extraction d'air est approprié pour les zones à climats froids. En revanche, dans les climats chauds et humides, la pression négative créée par un tel système risque d'aspirer l'humidité dans les cavités du bâtiment et dans les parois, ce qui pourrait entraîner des dommages dus à la condensation.

Ces systèmes sont relativement simples et peu coûteux à installer. Ils consistent en un ou plusieurs ventilateurs reliés à un point d'évacuation unique et central dans le bâtiment.

2.3.5.2 Systèmes de ventilation par insufflation

Les systèmes de ventilation par alimentation d'air utilisent un ventilateur pour pressuriser l'espace intérieur du bâtiment en introduisant de l'air extérieur, ce qui permet d'évacuer l'air

intérieur du bâtiment à travers les trous ou les éventuelles bouches d'aération dans l'enveloppe du bâtiment (Figure 70).

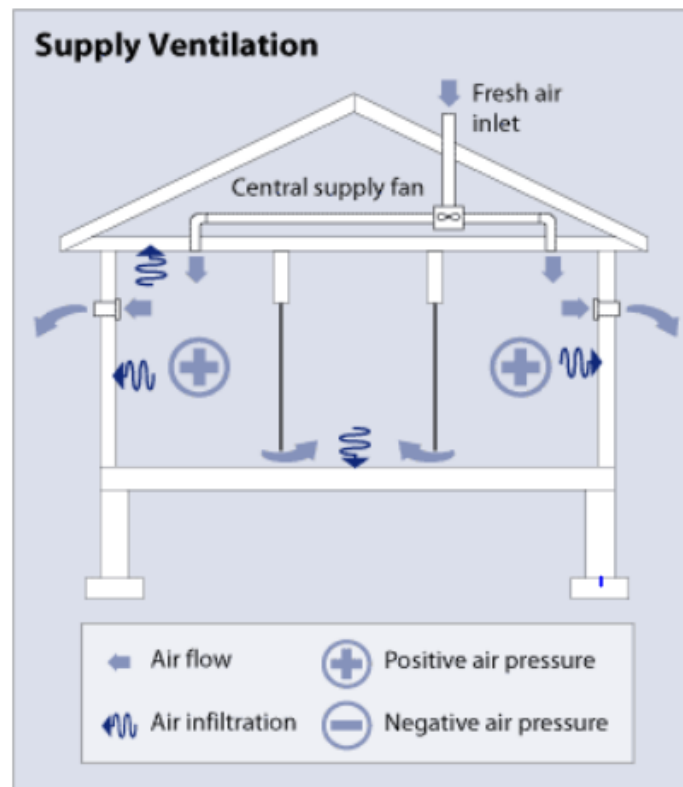


Figure 70: Ventilation par insufflation d'air (Energy saver, n.d.)

Comparée à la ventilation par extraction, la ventilation mécanique par insufflation d'air présente l'avantage significatif de filtrer avec efficacité l'air entrant dans le bâtiment. Cela permet d'exercer un meilleur contrôle sur la qualité de l'air intérieur. Cette approche réduit considérablement les risques d'introduction de polluants dans l'espace intérieur et empêche l'aspiration de gaz de combustion. En outre, elle offre la possibilité de filtrer les particules de poussière contenues dans l'air extérieur qui pénètre dans le bâtiment.

Les systèmes de ventilation par soufflage sont mieux adaptés aux climats chauds ou mixtes.

En revanche, dans les climats froids, ces systèmes risquent d'entraîner des problèmes de condensation et de moisissure. L'humidité de l'air en contact avec les parois extérieures froides accroît le potentiel de condensation et favorise la prolifération de moisissures.

Tout comme les systèmes de ventilation par extraction, les systèmes de ventilation par insufflation d'air sont peu coûteux et relativement simples à mettre en place. Ils sont composés d'un ventilateur et de conduits d'alimentation distribués dans différentes zones du bâtiment. Étant donné que l'air extérieur est introduit de manière localisée, il peut être nécessaire de mélanger l'air extérieur avec l'air intérieur avant son introduction pour prévenir la création de courants d'air froid pendant la saison hivernale.

2.3.5.3 Système de ventilation équilibré

Un système de ventilation équilibrée constitue un autre type de ventilation mécanique. Lorsqu'il est correctement conçu, ce système ne provoque ni dépression par aspiration ni pression par soufflage à l'intérieur. Au lieu de cela, il évacue l'air intérieur vicié tout en introduisant de l'air extérieur frais en quantités quasiment équivalentes (voir Figure 71). Pour garantir son efficacité, ce type de système implique généralement deux systèmes de conduits et deux ventilateurs soigneusement positionnés afin d'assurer une répartition adéquate de l'air dans tout l'espace intérieur.

Du fait de leur apport direct d'air extérieur, les systèmes de ventilation équilibrée permettent d'intégrer des filtres conçus pour éliminer les particules de poussière et de pollen de l'air extérieur avant son entrée dans le bâtiment. Cependant, il est à noter que ces systèmes sont plus coûteux en raison de la nécessité de disposer de deux ventilateurs distincts ainsi que de systèmes de conduits doubles. Les systèmes de ventilation équilibrée, comme les systèmes de soufflage et d'extraction, ne déshumidifient pas l'air d'appoint avant de l'introduire dans le bâtiment. Aussi, Afin d'éviter les courants d'air froid pendant l'hiver, il peut être nécessaire de mélanger l'air extérieur avec l'air intérieur avant de le distribuer, tout comme les systèmes de ventilation par soufflage.

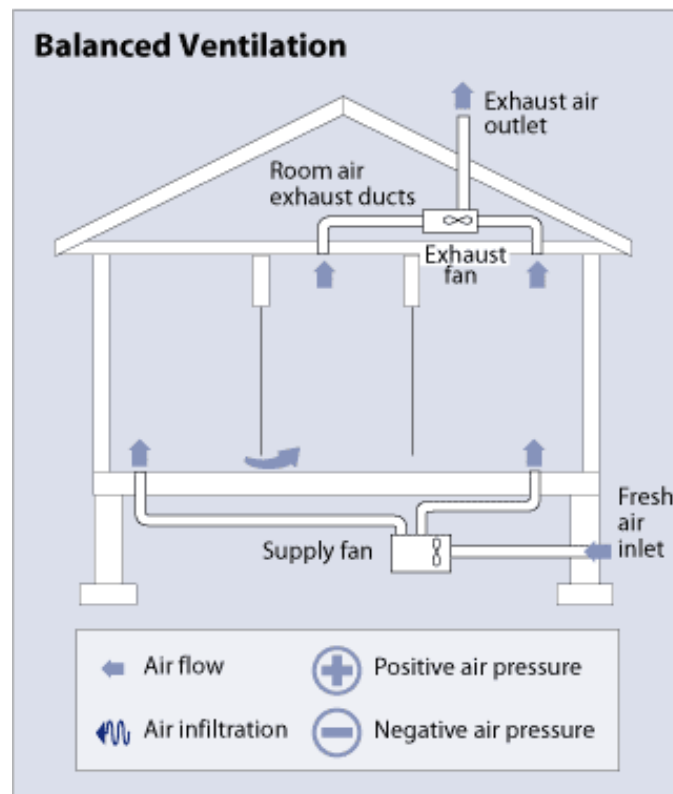


Figure 71: Ventilation équilibrée (Energy saver, n.d.)

2.3.5.4 Systèmes de ventilation à récupération d'énergie

Les systèmes de récupération d'énergie pour la ventilation sont conçus dans le but de gérer le renouvellement de l'air à l'intérieur d'un bâtiment tout en minimisant les pertes d'énergie. Ces

dispositifs se basent sur un processus d'échange thermique entre l'air intérieur vicié, réchauffé, et l'air extérieur frais mais froid (voir Figure 72). En conséquence, ces systèmes induisent des avantages substantiels sur le plan de la conservation énergétique.

Pendant la saison froide, ces systèmes contribuent à réduire les dépenses de chauffage préchauffant l'air extérieur grâce à la chaleur de l'air intérieur vicié. Pendant la période estivale, ce processus permet à l'air intérieur refroidi de tempérer l'air chaud extérieur avant son introduction, réduisant ainsi les besoins de refroidissement.

Les systèmes de ventilation à récupération d'énergie présentent généralement un coefficient de performance compris entre 0,7 et 0,8, ce qui signifie qu'ils ont la capacité de transférer entre 70 % et 80 % de l'énergie contenue dans l'air extrait vers l'air introduit. Cependant, leur rentabilité économique est plus prononcée dans les climats extrêmement chauds ou froids, ainsi que dans les régions où les coûts énergétiques sont élevés.

Les coûts d'installation des systèmes de ventilation à récupération d'énergie sont souvent plus élevés que ceux des autres systèmes de ventilation. Cette catégorie d'installation nécessite également des dépenses supplémentaires en matière d'entretien. Afin de réduire les coûts, une installation qui combine des conduits déjà existants est souvent privilégiée (Energy saver, n.d.).

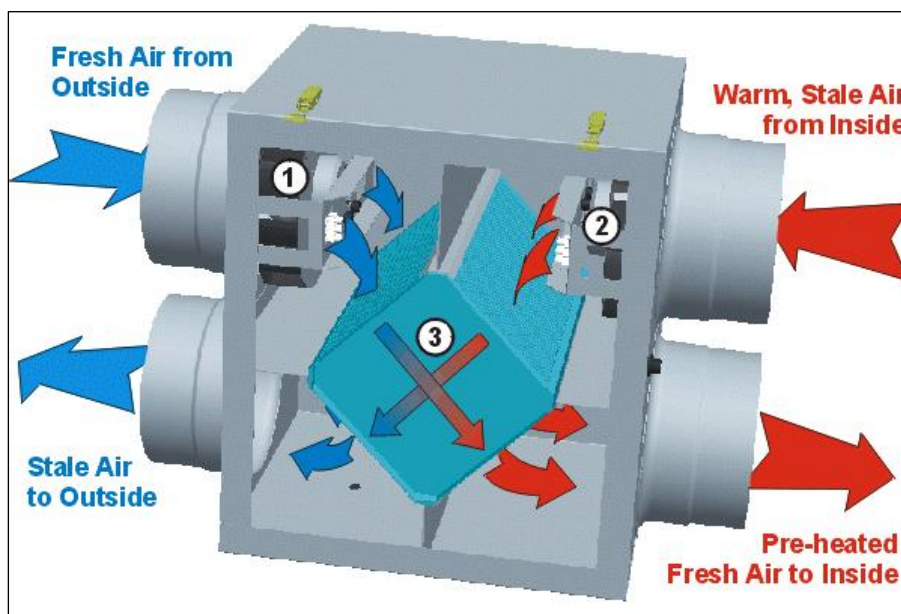


Figure 72: Système de ventilation par récupération de chaleur (Central Virginia Radon, 2021)

2.3.6 Combinaison entre ventilation naturelle et climatisation : Mode mixte

La ventilation en "mode mixte" désigne une approche hybride du conditionnement de l'espace qui utilise une combinaison de ventilation naturelle à partir de fenêtres ouvrantes (contrôlées manuellement ou automatiquement) et de systèmes mécaniques comprenant des équipements mécaniques de distribution d'air ou de refroidissement. Le système de conditionnement d'air en "mode mixte" utilise la ventilation naturelle pour rafraîchir le bâtiment lorsque les conditions extérieures sont favorables. Dans le cas où les conditions extérieures sont défavorables, des équipements de rafraîchissement mécanique et de climatisation sont utilisés.

L'objectif de cette approche est d'assurer un confort optimal tout en économisant de l'énergie et en réduisant les coûts d'exploitation importants associés à l'utilisation de la climatisation.

Différentes méthodes de classification décrivent l'intégration des stratégies de contrôle de la ventilation naturelle et de la climatisation, généralement en fonction de leur coexistence dans un même espace ou de leur utilisation simultanée :

- **Concurrent (même espace, même heure)**

Le mode mixte Concurrent (ou simultané) désigne une stratégie de contrôle de l'environnement intérieur dans laquelle la ventilation naturelle et la climatisation fonctionnent en même temps (Figure 73). Cela signifie que l'air frais provenant de l'extérieur est introduit dans l'espace via la ventilation naturelle, tandis que l'air intérieur est refroidi en utilisant des systèmes de climatisation (Brager et al., 2007).

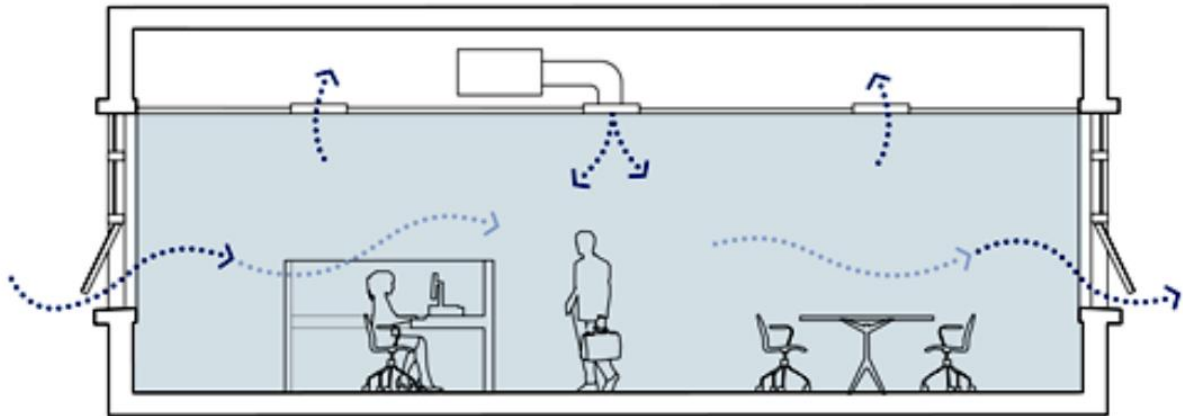


Figure 73: Schématisation de la ventilation en mode mixte Concurrent (CBE, 2013)

- **Change-over (Même espace, horaires différents)**

Le mode mixte change-over désigne une méthode de contrôle de l'environnement intérieur dans laquelle la ventilation naturelle et la climatisation sont combinées, mais fonctionnent à des horaires différents. Cela signifie que pendant certaines heures de la journée, seule la ventilation naturelle est utilisée pour renouveler l'air intérieur, tandis que pendant d'autres heures, la climatisation est activée pour réguler la température (voir Figure 74).

Ce système de basculement implique l'utilisation de capteurs pour détecter les conditions environnementales intérieures et extérieures et déterminer le moment du changement de mode entre la ventilation naturelle et la climatisation.

Les capteurs surveillent divers paramètres tels que la température, l'humidité, la qualité de l'air et la présence humaine dans la pièce. Lorsqu'un capteur indique que les conditions sont suffisamment confortables pour utiliser la ventilation naturelle, le système peut désactiver la climatisation et permettre à l'air extérieur de circuler librement dans la pièce.

En revanche, lorsque les capteurs indiquent des conditions inconfortables, le système active la climatisation pour maintenir la température et la qualité de l'air à des niveaux de confort appropriés.

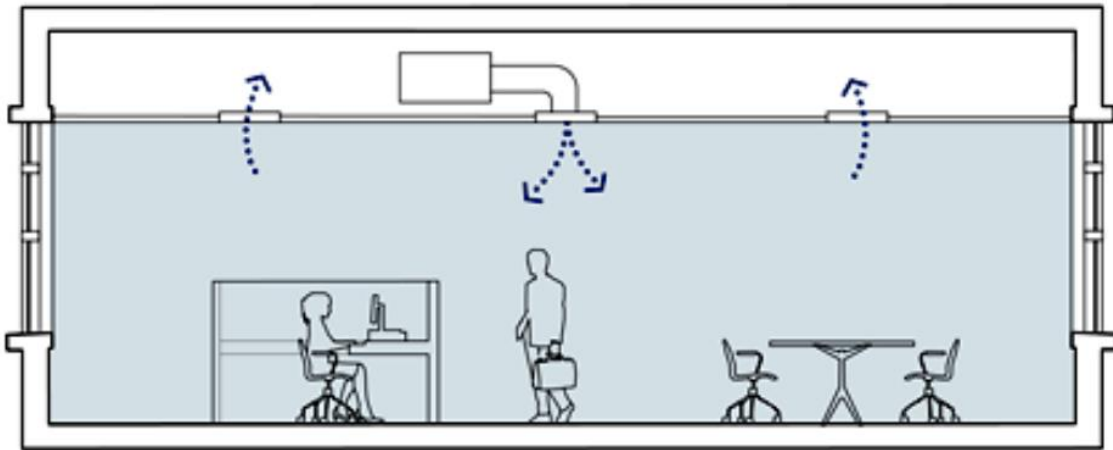


Figure 74: Schématisation de la ventilation en mode mixte change-over (CBE, 2013)

- **Zonés (espaces différents, même temps)**

Les systèmes de climatisation zonés (ou par zones) font référence à une stratégie de conditionnement de l'environnement intérieur dans laquelle différentes zones d'un bâtiment sont conditionnées séparément et simultanément. Cela signifie que chaque zone peut avoir des conditions de température et de qualité de l'air différentes, qui sont contrôlées par des techniques et des systèmes de refroidissement ou de rafraîchissement différents qui fonctionnent en même temps (Figure 75).

Ce système est souvent utilisé dans des bâtiments de grandes structures, tels que les grands immeubles de bureaux ou les centres commerciaux, où il peut être nécessaire de maintenir des conditions différentes pour différentes zones en fonction de leur utilisation (Brager et al., 2007).

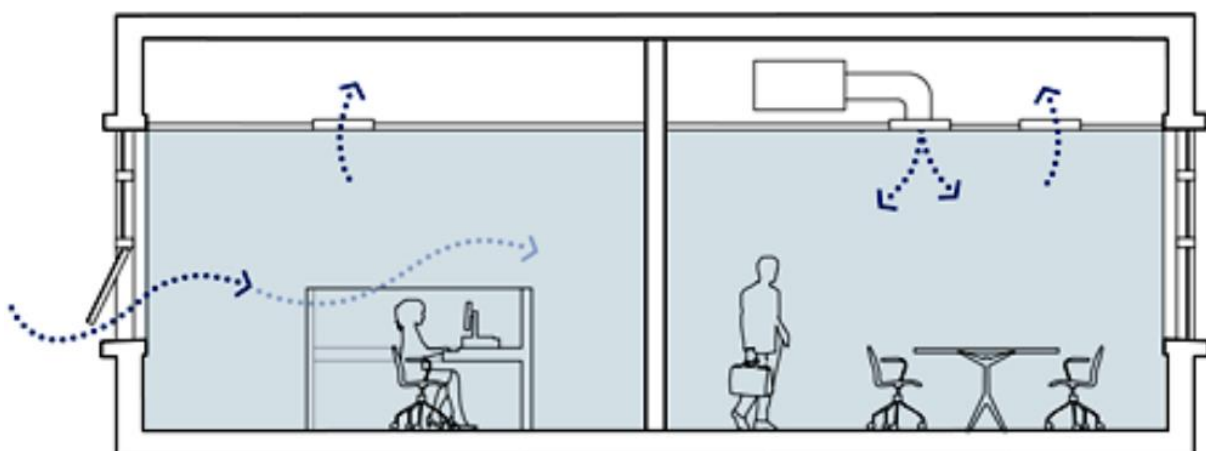


Figure 75: Schématisation de la ventilation en mode mixte zoné (CBE, 2013)

2.3.7 Dispositif d'ombrage

Dans l'hémisphère Nord, la méthode de positionnement conventionnelle des bâtiments consiste à orienter la façade la plus longue d'un bâtiment sur un axe Est-Ouest réel afin de réduire la surface des façades exposées à l'est et à l'ouest. Cette méthode consiste à positionner un bâtiment de manière à bénéficier de l'apport solaire en hiver et à se prémunir contre la surchauffe en été, grâce à des dispositifs d'ombrage.

Pour maximiser la quantité d'énergie captée pendant l'hiver, les façades orientées au Sud peuvent intégrer plusieurs ouvertures, nécessitant toutefois un ombrage estival. Cette combinaison permet d'exploiter le rayonnement solaire en hiver tout en régulant l'apport estival grâce à des mécanismes d'ombrage. La variation saisonnière de la hauteur du Soleil influence ce schéma, avec des dispositifs d'ombrage disponibles pour atténuer les apports solaires en été. Les façades Sud bénéficient de mécanismes d'ombrage horizontaux (Figure 76), tandis que les façades orientées à l'Est et à l'Ouest nécessitent des systèmes d'ombrage verticaux pour contrôler les rayonnements horizontaux (Figure 77).

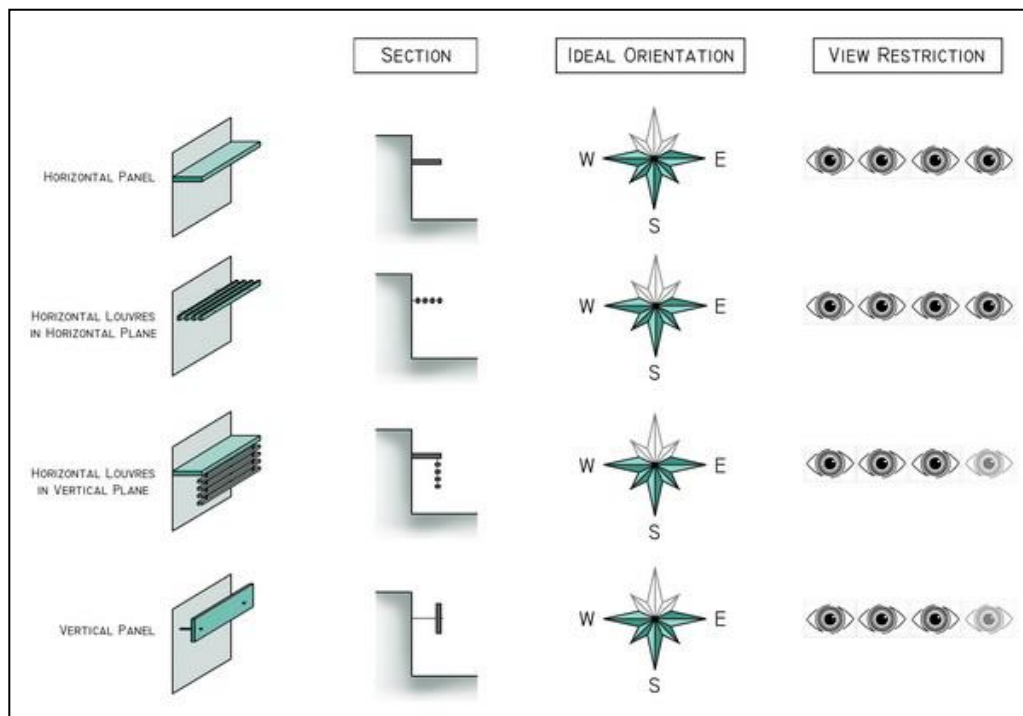


Figure 76: Typologie de base des dispositifs de protection solaire horizontaux pour les expositions au Sud (Curator: Hall of Art & Architecture, 2015)

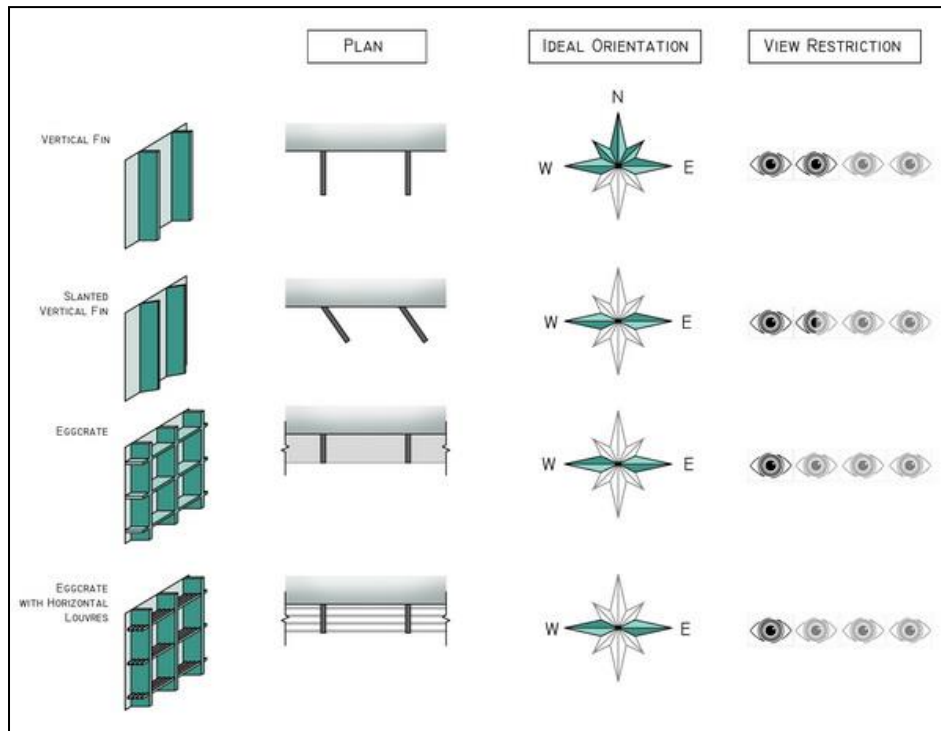


Figure 77: Dispositifs d'ombrage pour les expositions non méridionales (Curator: Hall of Art & Architecture, 2015)

La largeur des dispositifs d'ombrage peut être calculée selon l'équation suivante (Figure 78 et Equation 4) :

$$X = (1/2)Y \quad (4)$$

où X est la longueur du porte-à-faux d'ombrage requis et Y est la distance entre le bas de la porte ou de la fenêtre et la base du porte-à-faux.

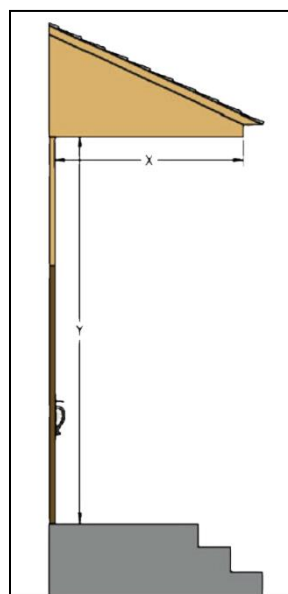


Figure 78: Géométrie du porte-à-faux de la fenêtre (Rogue valley door, n.d.)

2.4 Standards et labels pour les performances énergétiques des bâtiments

L'efficacité énergétique des bâtiments est devenue une préoccupation majeure dans le contexte actuel de lutte contre le changement climatique. Les bâtiments représentent en effet une part importante des émissions de gaz à effet de serre, notamment en raison de leur consommation énergétique pour le chauffage, le refroidissement, l'éclairage et les équipements.

La standardisation et la labellisation constituent des pratiques qui permettent aux concepteurs et constructeurs de réaliser des bâtiments aux performances thermiques et énergétiques supérieures aux exigences des réglementations en vigueur, instaurant ainsi de nouveaux niveaux de référence.

Plusieurs labels et standards existent pour promouvoir et encourager la mise en œuvre des mesures visant à réduire la consommation d'énergie, minimiser les émissions de gaz à effet de serre et à améliorer le confort des occupants. Ils concernent aussi bien les bâtiments neufs que ceux rénovés, on parle dans ce dernier cas de rénovation énergétique. Cette tendance reflète l'engagement mondial en faveur de l'amélioration de l'efficacité énergétique des constructions et du renforcement des normes environnementales dans le domaine du bâtiment (Seddiki, 2017).

Une synthèse des labels et standards les plus utilisés est présentée ci-dessous.

2.4.1 Le label « Minergie » (Minergie, 2023)

Le label Minergie est un standard suisse pour les bâtiments neufs et rénovés. Les bâtiments certifiés Minergie doivent répondre à des critères stricts en termes de consommation énergétique, d'isolation thermique, de ventilation, d'utilisation de sources d'énergies renouvelables et de qualité de l'air intérieur. Il se structure en trois catégories distinctes, selon les objectifs de performance :

- *MINERGIE*

Pour les nouvelles constructions : la consommation d'énergie ne doit pas excéder 38 kWh/m² .an.

Pour les rénovations : la consommation d'énergie ne doit pas dépasser 60 kWh/m² /an.

- *MINERGIE – ECO*

Les exigences énergétiques de ce label sont les mêmes que pour le label MINERGIE, mais avec une dimension écologique plus importante.

- *MINERGIE – P (Passif)*

Établit des critères comparables à ceux du label « Passivhaus » avec une exigence de consommation énergétique inférieure ou égale à 15 kWh/m².an.

2.4.2 Le label « HQE » (Alliance HQE-GBC, 2023)

La Haute Qualité Environnementale (HQE) est un label de certification pour les bâtiments neufs ou rénovés, axé sur la performance environnementale. Il évalue des critères tels que l'efficacité énergétique, la gestion de l'eau, le confort des occupants et la qualité de l'air intérieur. La HQE encourage une approche globale en prenant en compte les aspects sociaux, économiques et environnementaux.

2.4.3 Le label « BBC Effinergie Rénovation » (Effinergie, 2021)

Le label « BBC Effinergie Rénovation » (Bâtiments Basse Consommation et bas carbone) vise à promouvoir la rénovation énergétique des bâtiments résidentiels et tertiaires. Les valeurs spécifiques de consommation d'énergie primaire varient en fonction du type de bâtiment (résidentiel, tertiaire, etc.).

Ces exigences strictes favorisent l'efficacité énergétique en réduisant significativement les demandes de chauffage, de refroidissement et d'éclairage, contribuant ainsi à la durabilité et à la réduction des émissions de carbone.

2.4.4 Le standard « Passivhaus » (Passive House Institute, 2023)

Le label "Passivhaus" (bâtiment passif), est une certification internationale reconnue pour les bâtiments neufs résidentiels et non résidentiels qui atteignent un niveau élevé d'efficacité énergétique et de confort intérieur. Cette norme a été développée en Allemagne dans les années 1990 et repose sur le concept de construction passive, visant à minimiser la consommation d'énergie pour le chauffage, la climatisation et la ventilation.

Pour obtenir la certification "Passivhaus", les bâtiments doivent répondre à des critères rigoureux en matière d'isolation thermique, d'étanchéité à l'air et de ventilation. L'objectif est de réduire au maximum les pertes de chaleur et les fuites d'air, créant ainsi un environnement intérieur confortable et sain. Ils doivent notamment répondre aux critères suivants :

- Consommation d'énergie pour le chauffage et le refroidissement : $\leq 15 \text{ kWh /m}^2.\text{an}$
- Besoin énergie primaire⁹ : $\leq 120 \text{ kWh /m}^2.\text{an}$
- Étanchéité à l'air : $\leq 0.6 \text{ ACH}_{50}$

Contrairement à la réglementation, qui fixe des objectifs de performance globale à atteindre en laissant aux concepteurs le choix de sélectionner les solutions d'amélioration, le label Passivhaus propose des solutions techniques pour atteindre les objectifs de performance énergétique.

⁹ La consommation en énergie primaire comprend le chauffage, la production d'eau chaude, la ventilation, l'éclairage et l'électricité domotique

2.4.5 Le standard « EnerPHit » (Passive House Institute, 2023)

Les standards de rénovation énergétique, tels que le standard EnerPHit, offrent une solution pour réduire la consommation énergétique des bâtiments existants tout en améliorant leur confort et leur durabilité.

Le standard EnerPHit est un standard de rénovation énergétique des bâtiments existants, développé par le Passivhaus Institut en Allemagne. Il est basé sur le standard Passivhaus décrit ci-dessus qui vise à concevoir des bâtiments neufs très économes en énergie et confortables pour leurs occupants.

Pour obtenir la certification EnerPHit, un bâtiment doit respecter des critères précis en matière de consommation d'énergie, d'étanchéité à l'air, d'isolation thermique, de ventilation et d'utilisation d'énergies renouvelables. Deux méthodes peuvent être utilisées dans ce cadre, la méthode des composantes du bâtiment ou la méthode de la demande énergétique.

Le choix entre la méthode des composantes du bâtiment et la méthode de la demande énergétique dépend des objectifs de la rénovation énergétique, de la complexité du bâtiment, des matériaux utilisés et des contraintes techniques et financières. L'une ou l'autre des deux méthodes permet d'atteindre les exigences du standard EnerPHit et de garantir une performance énergétique élevée, une étanchéité à l'air optimale, une isolation thermique de qualité, une ventilation efficace et l'utilisation d'énergies renouvelables pour les bâtiments rénovés.

▪ La méthode des composantes du bâtiment

Cette méthode consiste à évaluer la performance énergétique de chaque composante du bâtiment (murs, fenêtres, toit, etc.) et à les optimiser pour atteindre les exigences du standard EnerPHit en termes d'isolation thermique, d'étanchéité à l'air, et de ventilation. Les critères de performance pour chaque composante sont définis en fonction de la zone climatique, la surface, l'orientation et l'utilisation du bâtiment. Cette approche permet de déterminer les points faibles du bâtiment en termes de performance énergétique et de cibler les améliorations nécessaires pour atteindre les exigences du standard EnerPHit.

La méthode des composantes du bâtiment est une approche efficace pour améliorer la performance énergétique des bâtiments existants, en particulier pour les bâtiments historiques ou patrimoniaux qui nécessitent une rénovation énergétique respectueuse de leur architecture et des matériaux d'origine. Cependant, cette méthode peut être coûteuse et complexe à mettre en œuvre en raison de la nécessité d'évaluer chaque composante du bâtiment de manière détaillée et spécifique.

Le Tableau 11 résume les principaux critères du Standard EnerPHit pour la méthode des composantes du bâtiment.

Tableau 11: Critères EnerPHit pour la méthode des composantes du bâtiment (Passive House

Institute, 2023).

Climate zone according to PHPP	Opaque envelope ¹ against...				Windows (including exterior doors)			Ventilation			
	...ground	...ambient air			Overall ⁴			Glazing ⁵	Solar load ⁶	Min. heat recovery rate ⁷	Min. humidity recovery rate ⁸
	Insulation	Exterior insulation	Interior insulation ²	Exterior paint ³	Max. heat transfer coefficient (U _{D/W,installed})			Solar heat gain coefficient (g-value)	Max. specific solar load during cooling period		
	Max. heat transfer coefficient (U-value)				Cool colours	[W/(m ² K)]			-	[kWh/m ² a]	%
	[W/(m ² K)]				-	[W/(m ² K)]			-	[kWh/m ² a]	%
Arctic	Determined in PHPP from project specific heating and cooling degree days against ground.	0.09	0.25	-	0.45	0.50	0.60	U _g - g*0.7 ≤ 0	100	80%	-
Cold		0.12	0.30	-	0.65	0.70	0.80	U _g - g*1.0 ≤ 0		80%	-
Cool-temperate		0.15	0.35	-	0.85	1.00	1.10	U _g - g*1.6 ≤ 0		75%	-
Warm-temperate		0.30	0.50	-	1.05	1.10	1.20	U _g - g*2.8 ≤ -1		75%	-
Warm		0.50	0.75	-	1.25	1.30	1.40	-		-	-
Hot		0.50	0.75	Yes	1.25	1.30	1.40	-		-	60 % (humid climate)
Very hot		0.25	0.45	Yes	1.05	1.10	1.20	-		-	60 % (humid climate)

▪ **La méthode de la demande énergétique**

La méthode de la demande énergétique est une approche alternative pour atteindre les exigences du standard EnerPHit. Cette méthode consiste à évaluer la demande énergétique du bâtiment dans son ensemble, en se focalisant sur la quantité d'énergie nécessaire pour le chauffage et le refroidissement. Cette méthode ne nécessite pas une évaluation détaillée de chaque composante du bâtiment, mais se concentre sur les caractéristiques de conception en établissant des critères de performance adaptés à la zone climatique et à l'usage du bâtiment. La méthode de la demande énergétique est particulièrement adaptée pour les bâtiments existants qui nécessitent une amélioration globale de leur performance énergétique.

Le Tableau 12 résume les principaux critères du standard EnerPHit pour la méthode de la demande énergétique.

Tableau 12: Critères EnerPHit pour la méthode de la demande énergétique (Passive House

Institute, 2023)

Climate zone according to PHPP	Heating	Cooling
	Max. heating demand	Max. cooling + dehumidification demand
	[kWh/(m ² a)]	[kWh/(m ² a)]
Arctic	35	equal to Passive House requirement
Cold	30	
Cool-temperate	25	
Warm-temperate	20	
Warm	15	
Hot	-	
Very hot	-	

Pour les deux méthodes, le standard EnerPHit fixe un critère d'étanchéité à l'air correspondant à un taux horaire maximal d'infiltration d'air du bâtiment ou de la zone de bâtiment de 1 ACH₅₀.

Conclusion

Le présent chapitre a permis d'analyser la relation entre le changement climatique et le secteur du bâtiment, et les nombreux impacts qui en découlent.

Il a mis en évidence la nécessité impérieuse d'adapter les bâtiments à ces impacts afin qu'ils puissent continuer à remplir leurs fonctions selon des normes établies.

Il a également exploré les mesures d'adaptation les plus appropriées et correspondant principalement aux mesures de rénovation thermique et énergétique des bâtiments existants. Dans ce contexte, plusieurs méthodes et standards internationalement usités ont été présentés.

Ainsi, et en raison de la rigueur de ses critères et de sa plus grande reconnaissance au niveau international, et en raison de son applicabilité aux besoins de rénovation énergétique de bâtiments existants, le standard « EnerPHit », avec la méthode de la demande énergétique, est retenu comme cadre de référence dans les chapitres suivants pour la modélisation et la simulation, aux fins d'évaluation, des mesures d'adaptation proposées.

Chapitre III

Modélisation et simulation du comportement thermique et des performances énergétiques d'un bâtiment éducatif

Le présent chapitre met l'accent sur les méthodes et outils mis en œuvre dans la présente thèse pour analyser les impacts du changement climatique sur la demande d'énergie du bâtiment étudié et évaluer les performances des mesures d'adaptation identifiées dans les chapitres précédents.

Il aborde plusieurs aspects clés, notamment la description et la modélisation du cas d'étude sélectionné, la génération des climats actuel et futurs de sa localisation, le processus de calibration du modèle et la simulation dynamique de différentes variantes correspondant aux mesures d'adaptation retenues pour cette étude.

3.1 Les bâtiments éducatifs et le changement climatique

Le cas d'étude sélectionné étant un bâtiment éducatif existant, la présente section met en évidence l'importance de cette catégorie de bâtiments en Algérie face au changement climatique actuel et futur, justifiant le choix du cas d'étude.

3.1.1 Vulnérabilité et adaptation des bâtiments éducatifs au changement climatique

Les bâtiments éducatifs se distinguent des autres bâtiments tertiaires et résidentiels notamment par la densité d'occupation, la nature et la typologie des activités, les catégories d'usagers et les nombreuses exigences réglementaires liées au confort et à la santé.

De ce fait, les bâtiments éducatifs peuvent être particulièrement vulnérables aux impacts du changement climatique, en particulier ceux relatifs à l'élévation des températures.

Le recours à des systèmes de climatisation pour atténuer ces impacts entraîne une consommation énergétique accrue, susceptible d'occasionner des dysfonctionnements et des interruptions d'alimentation électrique en sus des autres conséquences potentielles, et contribue à une augmentation des émissions de GES de ces bâtiments aggravant ainsi les implications du changement climatique.

De même, les édifices ne présentant pas une efficacité thermique suffisante (isolation, ventilation, ...) peuvent, selon les conditions climatiques, générer des conditions intérieures de confort défavorables et préjudiciables à leurs activités.

Pour toutes ces raisons, et face à l'aggravation du réchauffement global, il devient primordial d'accorder la priorité à l'adaptation des bâtiments éducatifs existants parmi les bâtiments tertiaires institutionnels et réduire ainsi leur vulnérabilité aux risques climatiques.

L'adaptation des bâtiments éducatifs existants au changement climatique permettrait de réaliser simultanément plusieurs bénéfices :

- amélioration du confort thermique des usagers et de leur productivité ;
- réduction de la consommation et des coûts énergétiques et substitution pour d'autres dépenses de fonctionnement ;
- optimisation des équipements énergétiques ;
- protection de l'environnement et réduction de l'empreinte carbone du bâtiment ;

- sensibilisation des générations futures aux risques du changement climatique et contribution à l'éducation au développement durable ;
- exemplarité et labellisation des établissements éducatifs.

Globalement, adapter les bâtiments éducatifs au changement climatique, par leur rénovation énergétique, contribue à les rendre plus économes en énergie, moins émetteurs de GES, tout en offrant à leurs usagers un environnement plus confortable et plus sain, notamment pour les plus vulnérables d'entre eux.

3.1.2 Les bâtiments éducatifs en Algérie

Les établissements éducatifs jouent un rôle essentiel dans le développement des enfants et des jeunes. Ils représentent le lieu où les élèves développent les connaissances et les compétences nécessaires pour devenir des citoyens informés et engagés, dans un cadre sûr et structuré. Ils peuvent également jouer un rôle important dans la valorisation de la diversité, de l'égalité et de la justice sociale en offrant une éducation inclusive dans un environnement respectueux et tolérant.

Cependant, pour assumer pleinement sa fonction, le cadre bâti de l'établissement éducatif doit offrir des conditions d'occupation favorables à toutes les activités et, en ce qui concerne cette étude, doit répondre notamment à des normes de confort thermique appropriées en fonction des conditions climatiques actuelles et futures.

Le secteur éducatif en Algérie est en pleine croissance depuis de nombreuses années. Le nombre d'élèves et d'établissements scolaires réalisés ces vingt dernières années ont atteint des chiffres considérables. Bien que la qualité de la conception et de la réalisation de ces établissements se soit considérablement améliorée ces dernières années, et devant l'urgence des besoins, la grande majorité du parc existant a été réalisée en recourant souvent à la reproduction de programmes et cahier des charges types, sans prise en considération des aspects liés aux impacts du changement climatique actuel et futur et les spécificités des différentes zones climatiques de l'Algérie. Cela a entraîné l'existence d'un parc important de bâtiments éducatifs mal adaptés, n'offrant pas les conditions de confort thermique adéquates, énergivores, quand ils disposent d'équipements énergétiques de climatisation et dont le bilan carbone serait largement hors normes.

Même si des actions pilotes ont été initiées ces dernières années pour promouvoir le recours aux énergies renouvelables dans les établissements scolaires, notamment pour la production d'eau chaude sanitaire et l'éclairage, aucun programme n'a été encore mis en place pour la rénovation énergétique selon des standards internationaux du parc éducatif algérien, qui est devenue un impératif pour toutes les raisons précédemment indiquées et principalement pour l'adaptation au changement climatique sévère prévu en Algérie.

3.2 Le cas d'étude

Dans cette section, le cas d'étude sélectionné est présenté.

Le recours à une étude de cas se justifie par l'approche méthodologique adoptée et consistant à analyser et évaluer, à l'aide d'outils de modélisation et de simulation puissants, le fonctionnement thermique et énergétique d'un bâtiment éducatif existant. Il permet d'aboutir à des propositions de solutions potentiellement et applicables et extrapolables à tout le parc existant.

3.2.1 Description du bâtiment étudié



Figure 79: Vue satellitaire du cas d'étude (Google Earth, 2023)



Figure 80: Situation géographique du cas d'étude (34°59'04" N, 1°27'30" W) (Google Earth, 2023)

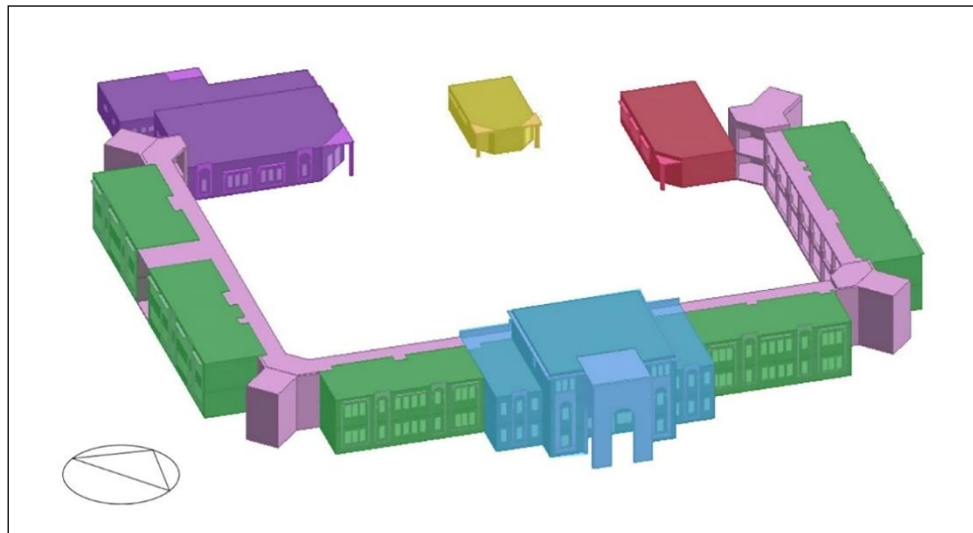
Le cas d'étude est représenté par un lycée 1000 places pédagogiques, situé à Zenata, une commune de la wilaya de Tlemcen en Algérie (Figures 79 et 80), d'une capacité d'accueil de 1 000 élèves.

De par sa situation géographique, le bâtiment du cas d'étude est caractérisé par un climat méditerranéen.

Il s'agit d'un bâtiment construit en 2016, d'une superficie bâtie au sol d'environ 2 350 m². Il est composé de deux blocs pédagogiques, d'un amphithéâtre, d'un bloc administratif, d'une cantine scolaire et d'un bloc sanitaire.

Les blocs pédagogiques (salles de classe, salle informatique et laboratoires) sont constitués de deux niveaux (R+1). Le bloc administratif comprend trois niveaux (R+2), l'amphithéâtre et la cantine un seul (Figure 81). Le Tableau 13 décrit les principales caractéristiques du bâtiment.

Toutes les informations relatives au bâtiment étudié ont été obtenues grâce à une enquête in-situ et à des documents fournis par le maître d'ouvrage (Direction des équipements publics de la wilaya de Tlemcen).



■ Administration ■ Salles de classe et laboratoires ■ Amphithéâtre ■ Cantine ■ Sanitaire ■ Couloirs et escaliers

Figure 81: Schématisation des différents blocs du bâtiment étudié.

Tableau 13: Description du bâtiment étudié.

Superficie bâtie (emprise au sol) (m ²)	2 347,52
Superficie utile totale des planchers (m ²)	2 449,39
Superficie utile des planchers des zones climatisées (m ²)	1 995,07
Superficie utile des planchers des zones non climatisées (m ²)	454,32
Volume utile total du bâtiment (m ³)	7 611,00

Volume utile chauffé du bâtiment (m ³)	6 236,09
Volume utile non chauffé du bâtiment (m ³)	1 374,91
Surface brute des parois extérieures (m ²)	3 062,40
Surface brute des cloisons (m ²)	2 002,80
Surface totale des fenêtres (m ²)	583,36
Ratio de surface fenêtres- parois (%)	19,05
Ratio d'occupation (personne/m ²)	0,41
Profil d'occupation typique	8h00 -12h00 et 13h00 - 17h00 (du dimanche au jeudi)
Équipements de chauffage	2 chaudières (gaz naturel) (P _{unit} = 290 kW / CoP = 85%)
Équipements de refroidissement	6 climatiseurs split (dans les bureaux administratifs + la bibliothèque + l'amphithéâtre)

3.2.2 Description des éléments constructifs du bâtiment étudié

Le Tableau 14 présente une description détaillée des différents éléments constructifs du bâtiment étudié.

Les caractéristiques thermiques des matériaux employées sont issues du DTR C3.2 et C3.4 (CNERIB, 2016).

Les résistances thermiques R_T et les coefficients de transmission thermique U de chaque élément sont calculées par le logiciel de modélisation et de simulation « DesignBuilder-EnergyPlus » (voir section 3.3 suivante).

Tableau 14: Caractéristiques physiques et thermiques des éléments constructifs du bâtiment étudié.

Élément	Composition	Épaisseur (m)	Conductivité thermique (W/m.K)	Densité (kg/m ³)	Capacité thermique spécifique (kJ/kg.K)	Valeur U (W/m ² .K)
Parois extérieures (ext. vers int.)	Enduit ciment	0,02	1,40	2 200	1,08	1,13
	Brique creuse	0,15	0,48	900	0,93	
	Lame d'air	0,05	Résistance thermique = 0.16 m ² .K/W			
	Brique creuse	0,10	0,48	900	0,93	
	Enduit ciment	0,02	1,40	2 200	1,08	
Cloisons intérieures	Enduit ciment	0,02	1,40	2 200	1,08	2,45
	Brique creuse	0,10	0,48	900	0,93	
	Enduit ciment	0,02	1,40	2 200	1,08	
Planchers Rez-de-chaussée	Chape de béton	0,10	1,75	2 500	1,08	3,30
	Forme mortier de ciment	0,03	1,40	2 200	1,08	
	Carreaux granito	0,03	2,10	1 900	0,93	
Planchers intermédiaires	Enduit ciment	0,01	1,40	2 200	1,08	2,16
	Dalle béton en corps creux	0,21	1,45	1 450	1,08	
	Enduit ciment	0,03	1,40	2 200	1,08	
	Carreaux granito	0,03	2,10	1 900	0,93	
Planchers supérieurs	Enduit ciment	0,01	1,40	2 200	1,08	2,28
	Dalle béton en corps creux	0,21	1,45	1 450	1,08	
	Étanchéité bitumineuse	0,01	0,23	1 050	1,65	
	Forme de pente mortier de ciment	0,05	1,40	2 200	1,08	
	Étanchéité bitumineuse	0,01	0,23	1 050	1,65	
	Gravier roulé	0,04	1,40	1 840	0,93	

Fenêtres	Simple vitrage 4 mm + menuiserie en bois					5,89
Portes	Bois					2,50

3.2.3 Caractérisation du climat de la localité de Tlemcen-Zenata

Le cas d'étude de la présente thèse se situe dans la localité Tlemcen-Zenata caractérisée par un climat méditerranéen chaud (Csa) selon la classification de Köppen-Geiger (voir Figure 28 et Tableau 2).

La Figure 82 et le Tableau 15 résument les principales caractéristiques climatiques de la localité de Tlemcen-Zenata, issues de la base de données du logiciel « Meteonorm » (Meteonorm, 2020) pour la période dite « contemporaine », considérée comme la plus récente en termes de données climatiques du lieu considéré. Cette période s'étend de 2000 à 2019 à l'exception des données de l'irradiation solaire pour lesquelles la période 1996-2015 est considérée.

Cette période « contemporaine » est utilisée dans ce qui suit pour caractériser le « climat actuel » dans les simulations du bâtiment étudié.

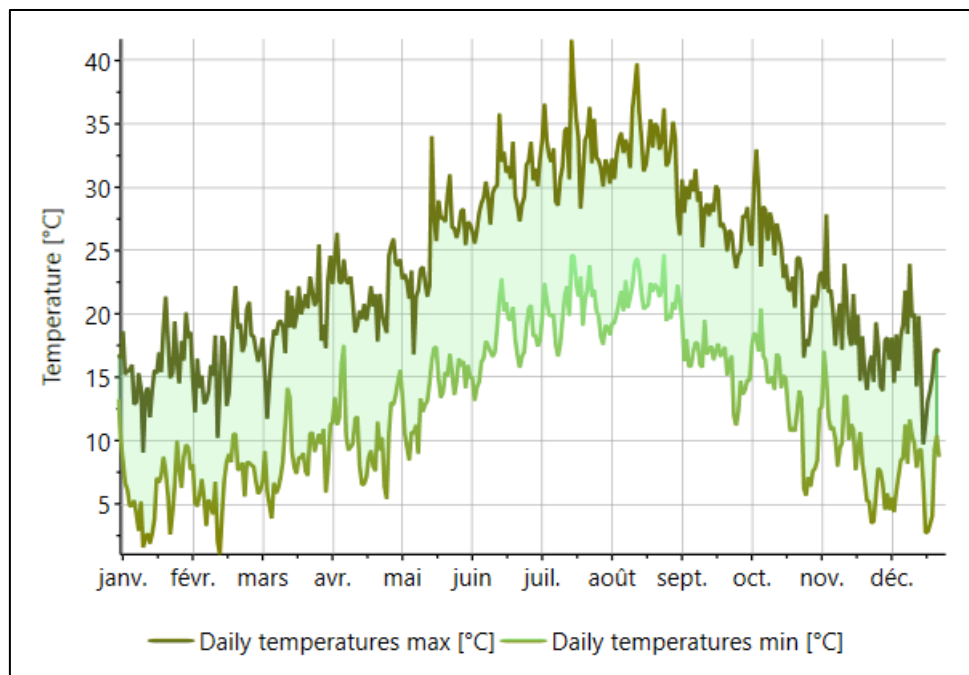


Figure 82: Évolution, pour la localité du cas d'étude (Tlemcen-Zenata), des températures journalières maximales et minimales pour le climat « actuel » (Meteonorm, 2020)

Tableau 15: Principales données climatiques de la localité de Tlemcen-Zenata pour la période « contemporaine » (Meteonorm, 2020).

Mois	Température (moyenne mensuelle) [°C]	Irradiation solaire globale sur un plan horizontal (moyenne mensuelle) [kWh/m ²]	Vitesse du vent (moyenne mensuelle) [m/s]
Janvier	10,4	91	2,2
Février	11,3	106	2,3
Mars	13,5	159	2,2
Avril	15,6	185	2,2
Mai	19,1	208	2,3
Juin	23,2	224	2,3
Juillet	26,2	224	2,3
Août	26,6	206	2,1
Septembre	23,3	162	1,9
Octobre	19,7	132	1,8
Novembre	14,5	97	2,2
Décembre	11,5	91	2,0

3.3 La simulation du comportement thermique et des performances énergétiques du bâtiment étudié

3.3.1 Le logiciel de modélisation et de simulation « DesignBuilder -EnergyPlus »

La modélisation et la simulation thermique et énergétique du bâtiment objet de notre étude et présenté précédemment ont été effectuées à l'aide du logiciel « DesignBuilder-EnergyPlus » (DesignBuilder-EnergyPlus, 2019).

« DesignBuilder-EnergyPlus » est un logiciel de simulation dynamique multizones, offrant la capacité de modéliser et de simuler de manière détaillée et le fonctionnement thermique et énergétique de chacune des zones composante le bâtiment en évaluant précisément leurs interactions thermiques.

Le logiciel dispose d'une interface graphique puissante permettant la modélisation tridimensionnelle (3D) du bâtiment, évitant ainsi de recourir à des outils supplémentaires de modélisation.

Ce logiciel utilise le moteur de simulation thermique et énergétique « EnergyPlus » mis au point par le Département de l'Énergie des États-Unis (EnergyPlus, 2018). Il utilise des modèles thermodynamiques pour évaluer les caractéristiques thermiques des bâtiments. Il considère les

propriétés des matériaux, les conditions climatiques, et les caractéristiques des systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation, d'éclairage, etc. Cet outil est reconnu pour ses performances de modélisation et est considéré comme une référence mondiale notamment pour la conception de bâtiments éco-énergétiques et l'évaluation de la conformité aux normes énergétiques.

Le choix porté sur le logiciel « DesignBuilder-EnergyPlus » se justifie donc par son adéquation avec les besoins de notre étude. Cette adéquation a été établie par une recherche bibliographique ayant démontré son application à de nombreuses études similaires (Pierangioli et al., 2017; Daly et al., 2014; Gercek & Durmuş Arsan, 2019; Alhuwayil et al., 2019; Porritt et al., 2012; Ascione et al., 2017; Barbosa et al., 2015; Attia & Gobin, 2020).

Le tableau 16 présente les principales données d'entrée et de sortie du logiciel. Ce dernier permet le calcul et visualisation d'une variété de données de simulation sur des échelles temporelles annuelles, mensuelles, journalières, horaires, voire à des échelles plus fines.

Tableau 16: Données principales d'entrée et de sortie du logiciel « DesignBuilder-EnergyPlus » (DesignBuilder-EnergyPlus, 2019)

Entrées	Sorties
Données du site (localisation, données météorologiques, orientations, etc.)	Températures intérieures par zone
Géométrie du bâtiment	Flux de chaleur à travers les éléments de construction
Composition des éléments de construction	Gains de chaleur sensible
Caractéristique des matériaux de construction	Apports internes de chaleur
Caractéristiques des ouvertures (portes, fenêtres)	Apports solaires directs et indirects
Dispositifs d'ombrage	Diagrammes de confort thermique
Taux et planning d'occupation	Demandes d' énergie
Caractéristiques des équipements d'éclairage et électroménager	Consommations d' énergie
Taux d'infiltration d'air (étanchéité)	Émissions de GES
Taux et planning de ventilation (naturelle et mécanique)	Dimensionnement des équipements de climatisation
Températures de consigne	Consommation de pointe
Caractéristiques des équipements de climatisation	Dimensionnement des équipements d'énergie renouvelable

Caractéristiques des équipements d'énergie renouvelable	Étude des coûts économiques
---	-----------------------------

3.3.2 Le cas de base et les variantes de simulation

Les simulations dynamiques du comportement thermique et des performances énergétiques du bâtiment étudié ont été effectuées avec un pas de temps horaire.

Un cas de base, correspondant au bâtiment existant (cas d'étude), ainsi que différentes variantes physiques du bâtiment, correspondant aux différentes mesures d'adaptation devant être évaluées, ont été simulés pour le climat « actuel » et deux climats « futurs », 2050 et 2080, considérant deux scénarios d'émissions du GIEC, modéré et extrême, à savoir respectivement les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 (IPCC, 2013).

Ces mesures d'adaptation sont simulées séparément et de manière cumulative, suivant un processus incrémental.

Le Tableau 17 ci-dessous résume les variantes physiques et climatiques simulées, qui sont décrites en détail dans les paragraphes ci-après et qui totalisent 60 cas de simulation.

Tableau 17: Matrice des cas de simulation

Les variantes physiques		Les variantes climatiques				
		Climat actuel	RCP4.5		RCP8.5	
			2050	2080	2050	2080
Cas de base Bâtiment existant (cas d'étude)		✓	✓	✓	✓	✓
Mesures d'Adaptation Séparées (MAS)						
MAS1	Isolation thermique par l'extérieur (ITE)	✓	✓	✓	✓	✓
MAS2	Utilisation de fenêtres performantes (UFP)	✓	✓	✓	✓	✓
MAS3	Amélioration de l'étanchéité à l'air (AEA)	✓	✓	✓	✓	✓
MAS4	Introduction d'une ventilation naturelle nocturne (VNN)	✓	✓	✓	✓	✓
MAS5	Installation de surplombs d'ombrage (OMB)	✓	✓	✓	✓	✓
MAS6	Utilisation d'un mode hybride de conditionnement d'air (MHC)	✓	✓	✓	✓	✓
Mesures d'Adaptation Cumulées (MAC)						

MAC1	ITE + UFP	✓	✓	✓	✓	✓
MAC2	ITE + UFP + AEA	✓	✓	✓	✓	✓
MAC3	ITE + UFP + AEA + VNN	✓	✓	✓	✓	✓
MAC4	ITE + UFP + AEA + VNN + OMB	✓	✓	✓	✓	✓
MAC5	ITE + UFP + AEA + VNN + OMB + MHC	✓	✓	✓	✓	✓

3.3.2.1 Le cas de base

Le cas de base correspond au bâtiment existant de notre cas d'étude.

Il est typiquement représentatif des pratiques de construction courantes des bâtiments éducatifs en Algérie.

Ce cas de base sera ensuite utilisé comme cas de référence pour la comparaison et l'évaluation de l'efficacité des différentes mesures d'adaptation considérées et dans les différents climats étudiés.

Pour les besoins de simulation, les valeurs utilisées pour le taux de ventilation naturelle et l'étanchéité à l'air (taux d'infiltration) dans le cas de base sont décrites dans le Tableau 18 ci-dessous.

Le taux de ventilation naturelle a été déterminé selon la littérature à 8 l/s.personne (Bakó-Biró et al., 2012 ; Clements-Croome et al., 2008).

La valeur de l'étanchéité à l'air a par contre été déterminée suite au processus de calibration du modèle de simulation décrit dans la section 3.5 ci-dessous.

Tableau 18: Valeurs des taux de ventilation naturelle et d'infiltration d'air (étanchéité à l'air) utilisées dans la simulation du cas de base

Taux de ventilation naturelle (l/seconde.personne)	8
Étanchéité à l'air / Taux d'infiltration d'air (ACH)	2

3.3.2.2 Simulation des mesures d'adaptation : les variantes de simulation physiques

Les différentes mesures d'adaptation considérées dans cette étude et listées dans le tableau 17 ci-dessus ont été sélectionnées sur la base des principaux critères de rénovation énergétique du standard EnerPHit (voir section 2.4.5).

Ces mesures sont décrites dans le Tableau 19 ci-dessous et sont simulées séparément et de manière cumulative, suivant un processus incrémental, tel que précisé dans le Tableau 17 des variantes de simulation. Cette incrémentation respecte l'approche du standard EnerPHit qui priorise les stratégies passives.

Tableau 19: Description des mesures d'adaptation considérées dans cette étude

N°	Mesures	Description
MAS1	Isolation thermique par l'extérieur (ITE)	Ajout d'une isolation thermique par l'extérieur Parois extérieures : polyuréthane / 70 mm / $U = 0,29$ W/m ² .K Planchers supérieurs : polyuréthane / 80 mm / $U = 0,30$ W/m ² .K
MAS2	Utilisation de fenêtres performantes (UFP)	Remplacement des fenêtres à simple vitrage par des fenêtres performantes à faible émissivité $U_w = 1,0$ W/m ² .K / SHGC = 0,218
MAS3	Amélioration de l'étanchéité à l'air (AEA)	Réduction du taux d'infiltration d'air à un taux de 0,8 ACH ₅₀
MAS4	Introduction d'une ventilation naturelle nocturne (VNN)	Introduction d'une ventilation naturelle nocturne pour évacuer l'excès de chaleur emmagasiné pendant les journées chaudes. Mesure activée durant la saison chaude et la mi-saison (avril à octobre)
MAS5	Installation de surplombs d'ombrage (OMB)	Installation de surplombs horizontaux de 1 m au-dessus des fenêtres extérieures sur les façades Est, Sud et Ouest.
MAS6	Utilisation d'un mode hybride de conditionnement d'air (MHC)	Installation d'un système hybride de climatisation par zone alliant ventilation naturelle, ventilation mécanique avec récupération d'énergie et conditionnement d'air (voir section 2.3.5.4)

3.3.2.3 Les variantes de simulation climatiques

Dans cette étude, en sus du climat « actuel » (voir paragraphe 3.2.3), deux climats « futurs » correspondants aux horizons temporels 2050 et 2080, ont été considérés pour les raisons principales suivantes :

- i. Les années 2050 et 2080 sont des horizons significatifs dans le futur qui permettent de projeter les impacts à moyen et long terme du changement climatique. Le choix de ces deux horizons permettra l'évaluation à la fois des défis immédiats que le bâtiment pourrait rencontrer d'ici 2050, ainsi que les évolutions à plus long terme qui pourraient se produire d'ici 2080.
- ii. Les modèles climatiques et les prévisions indiquent que d'ici 2050 et 2080, les impacts du changement climatique seront de plus en plus visibles et significatifs. Ces périodes permettent d'observer l'évolution des températures, des précipitations, des événements climatiques extrêmes, et d'autres facteurs pertinents pour l'adaptation des bâtiments.
- iii. Alignement avec les politiques et les objectifs : de nombreux plans d'adaptation au changement climatique, ainsi que les engagements internationaux comme l'Accord de Paris, se concentrent sur les échéances de 2050 et au-delà. En choisissant ces années, cette étude sera en accord avec les objectifs mondiaux de lutte contre le changement climatique et d'adaptation.
- iv. Planification à long terme : l'adaptation des bâtiments est un processus qui nécessite des décisions de conception et d'aménagement à long terme. Les années 2050 et 2080 permettent d'évaluer comment les décisions prises aujourd'hui pourraient avoir un impact sur la performance des bâtiments à l'avenir.
- v. Cohérence avec la littérature : de nombreuses recherches dans la littérature ont utilisées ces deux échéances temporelles afin d'estimer l'impact du changement climatique sur le bâtiment et proposer des mesures d'adaptation (Andrić et al., 2016; Chow et al., 2013; Collins et al., 2010; Daly et al., 2014; Huang & Hwang, 2016; Porritt et al., 2011; Rubio-Bellido et al., 2016; Triana et al., 2018; Vasaturo et al., 2018; Wang & Chen, 2014 ; Cellura et al., 2017).

Ces climats « futurs » ont également été étudiés sous deux scénarios d'émission différents, à savoir les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 (voir section 1.6.2).

Les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 représentent des niveaux de concentration de gaz à effet de serre modérés et extrêmes, respectivement. Ces scénarios sont largement utilisés dans les évaluations du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC, 2013) pour évaluer les risques et les impacts potentiels des changements climatiques sur la planète. Ils sont donc considérés comme étant les scénarios les plus appropriés pour étudier les impacts climatiques et pour développer des mesures d'adaptation contre le changement climatique.

Ainsi, le choix des scénarios RCP4.5 et RCP8.5 pour étudier les impacts climatiques est motivé par leur large utilisation dans la recherche scientifique, leur représentativité des futurs possibles et leur capacité à fournir un cadre pour le développement de mesures d'adaptation et d'atténuation.

Les données météorologiques nécessaires à la simulation des différentes variantes climatiques ainsi définies ont été générées à l'aide du logiciel Meteonorm, comme décrit dans la section suivante.

3.4 Les données météorologiques pour la simulation

Les données météorologiques nécessaires pour les simulations des différentes variantes climatiques ont été générées par le logiciel Meteonorm version 8.0.3 (Meteonorm, 2020).

Meteonorm est largement utilisé dans les études et recherches liées à l'énergétique du bâtiment, permettant d'obtenir des ensembles de données météorologiques historiques et actuelles (Ali-Toudert & Weidhaus, 2017 ; Dadoo & Gustavsson, 2016 ; Harmathy et al., 2016 ; Mata et al., 2013 ; Rubio-Bellido et al., 2016 ; Tumminia et al., 2018 ; Yun, 2018) et permettant également de générer des climats « futurs » sous différents scénarios d'émission (Bienvenido-Huertas, Rubio-Bellido, et al., 2020 ; Bienvenido-Huertas, Sánchez-García, et al., 2020 ; Erba et al., 2019 ; Erba et al., 2019 ; Nematchoua et al., 2019 ; Osman & Sevinc, 2019).

Ce logiciel produit un certain nombre de données pour les variables telles que la température de l'air, l'humidité relative, le rayonnement solaire et la vitesse du vent, en plus de certains autres paramètres nécessaires à la simulation énergétique (Yassaghi et al., 2019 ; Meteonorm, 2020).

Il permet de générer de manière stochastique des années types avec des données à résolution horaire ou sub-horaire avec une couverture géographique très large (Remund et al., 2010 ; Herrera et al., 2017) et dans divers formats, dont le format EnergyPlus Weather (EPW) utilisé par le logiciel de simulation DesignBuilder-EnergyPlus.

La version de Meteonorm utilisée dans cette étude fournit une gamme complète de données météorologiques, comprenant des données historiques, des données contemporaines et plusieurs projections pour l'avenir jusqu'à l'année 2100. Elle incorpore trois scénarios d'émission, à savoir les scénarios RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5, en agrégeant les données provenant de dix modèles climatiques globaux sélectionnés dans le cinquième rapport d'évaluation du GIEC (AR5) (IPCC, 2013).

3.4.1 Génération des fichiers météorologiques EPW pour la simulation

Le format de données météorologiques EPW (EnergyPlus Weather) a été initialement conçu pour être compatible avec les logiciels de simulation EnergyPlus et ESP-r, et a depuis été adopté comme format standard par de nombreux autres outils de simulation de bâtiments (DesignBuilder-EnergyPlus, 2019).

Les fichiers EPW contiennent des données météorologiques détaillées pour une localisation spécifique. Ils sont essentiels pour simuler avec précision les performances énergétiques des bâtiments.

La structure du fichier EPW est claire et textuelle, utilisant des virgules pour séparer les informations. Elle se fonde sur les données du format météorologique TMY2, mais a été réorganisée pour une visualisation plus aisée des données (DesignBuilder-EnergyPlus, 2019).

Le processus de génération des fichiers météorologiques EPW est décrit en Annexe II.

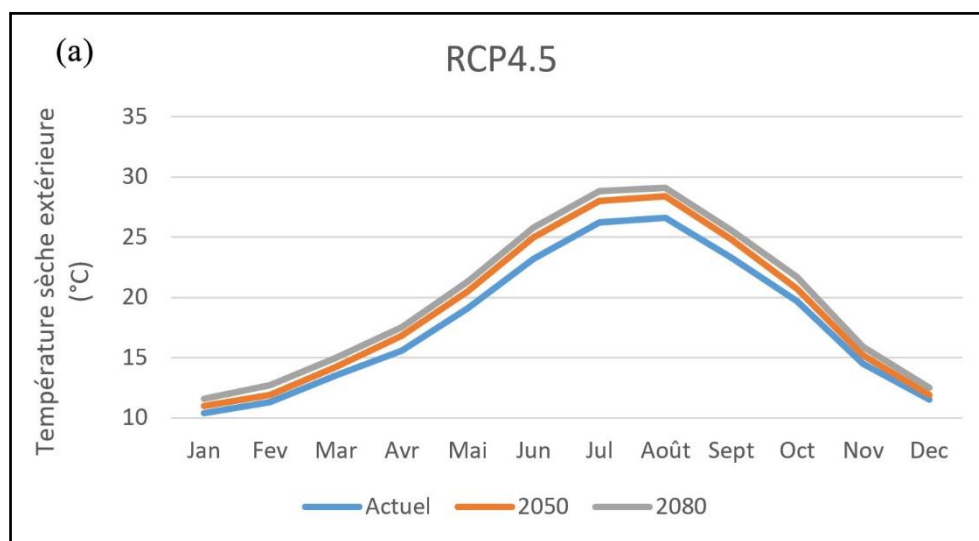
3.4.2 Analyse des données climatiques générées

Le logiciel Meteornorm permet de représenter toutes les données climatiques à différentes échelles de temps.

A titre d'illustration, la Figure 83 présente, pour la localité du cas d'étude (Tlemcen-Zenata), une comparaison des températures extérieures mensuelles moyennes pour le climat « actuel » et les climats « futurs », 2050 et 2080, pour les deux scénarios d'émission RCP4.5 et RCP8.5.

Ainsi, il apparaît une augmentation de la température annuelle à l'horizon 2050 de 1,1 °C dans le cas du scénario d'émission modéré (RCP4.5) et de 1,7 °C dans le cas du scénario d'émission extrême (RCP8.5).

A l'horizon 2080, cette augmentation serait de 1,9 °C dans le cas du scénario d'émission modéré (RCP4.5) et de 3,5 °C dans le cas du scénario d'émission extrême (RCP8.5).



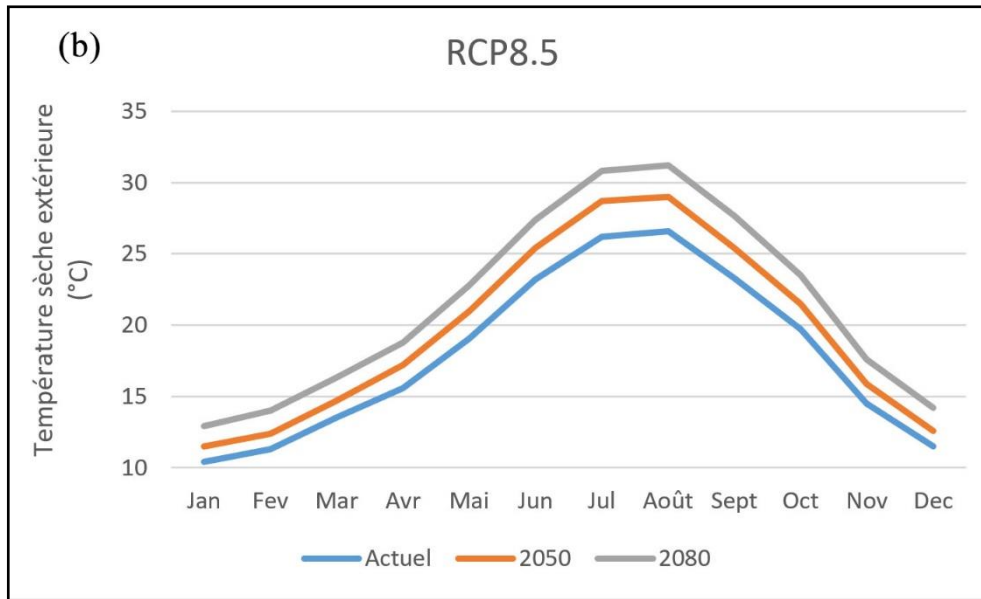


Figure 83: Évolution, pour la localité du cas d'étude (Tlemcen-Zenata), de la température extérieure mensuelle moyenne pour différents horizons climatiques et deux scénarios d'émission : (a) scénario RCP4.5. (b) scénario RCP8.5

La Figure 84 représente quant à elle, pour la même localité, une comparaison de l'évolution des températures journalières maximales et minimales entre le climat « actuel » et le climat « futur » de 2050, pour les deux scénarios d'émission RCP4.5 et RCP8.5.

Il apparaît dans ce cas des températures journalières maximales plus élevées et sur des périodes plus longues. Ceci caractérise l'effet du changement climatique attendu sur l'augmentation des températures et l'augmentation de la durée et des fréquences des périodes de canicule.

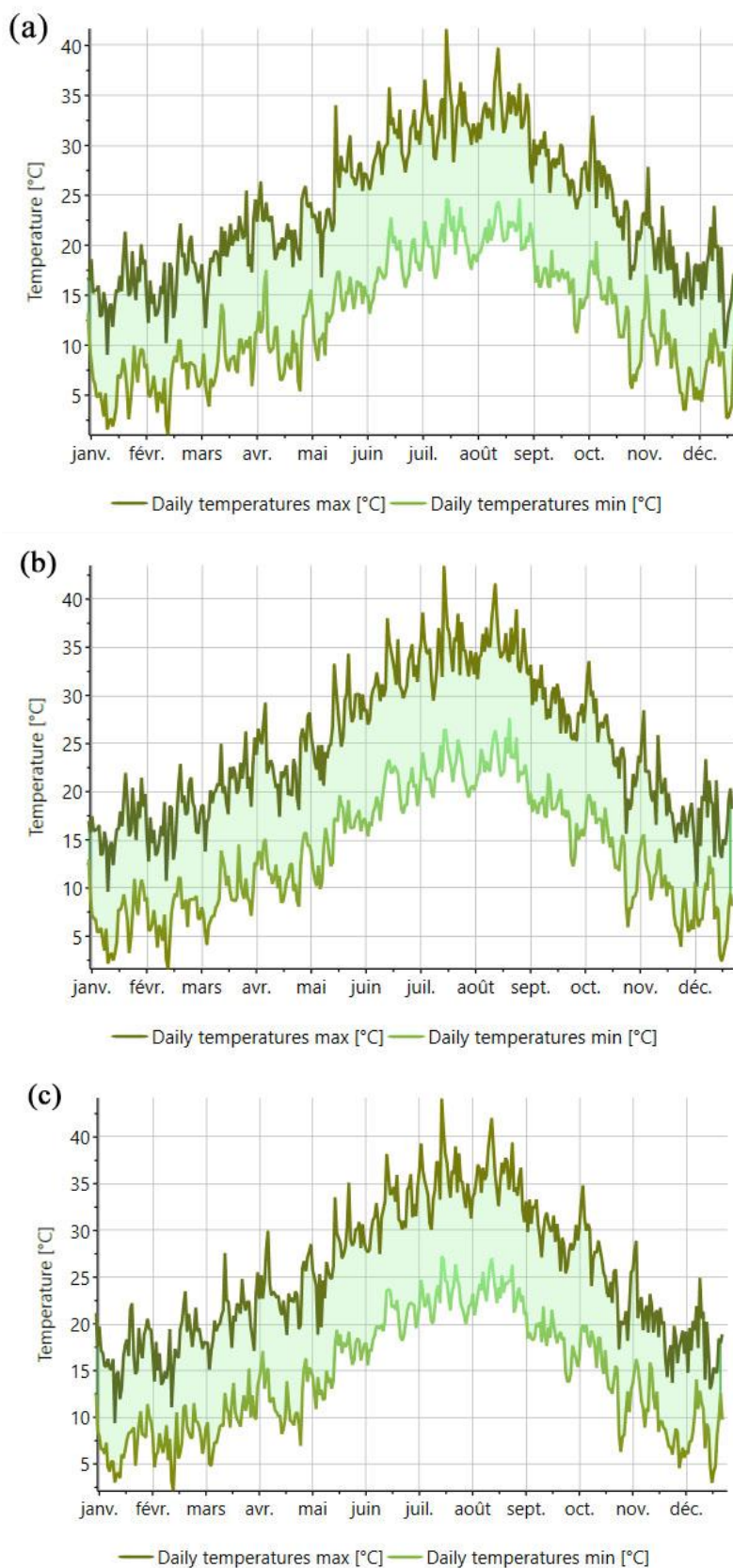


Figure 84: Évolution, pour la localité du cas d'étude (Tlemcen-Zenata), des températures journalières maximales et minimales pour : le climat actuel (a) ; le climat « futur » 2050/RCP4.5 (b) ; et le climat « futur » 2050/RCP8.5 (c) (Meteonorm, 2020)

3.5 Calibration du modèle de simulation thermique et énergétique du bâtiment

La calibration d'un modèle de simulation thermique du bâtiment est généralement nécessaire pour réduire le domaine d'incertitude des résultats du modèle. Ceci est réalisé en analysant la sensibilité du modèle à certains paramètres d'entrée du modèle en comparant ses résultats à des données mesurées et en évaluant leurs domaines respectifs d'incertitude (Coakley et al., 2014; Yin et al., 2016).

3.5.1 Le processus de calibration du modèle de simulation

Dans le cadre de cette étude, la calibration du modèle de simulation thermique et énergétique du bâtiment a été réalisée en considérant comme paramètre d'entrée du modèle le taux de d'infiltration d'air (étanchéité à l'air du bâtiment) dans les conditions normales de pression, car il présente un degré d'incertitude plus élevé que les autres paramètres d'entrée. La comparaison a porté sur les températures intérieures simulées et mesurées de trois salles de classe.

La campagne de mesures s'est déroulée durant la période la plus chaude de l'année 2021 (juin, juillet et août) et a inclus également la mesure de la température extérieure. Elle a été réalisée selon le protocole décrit en Annexe III et en recourant au dispositif de mesure développé dans le cadre de cette étude et décrit en Annexe IV.

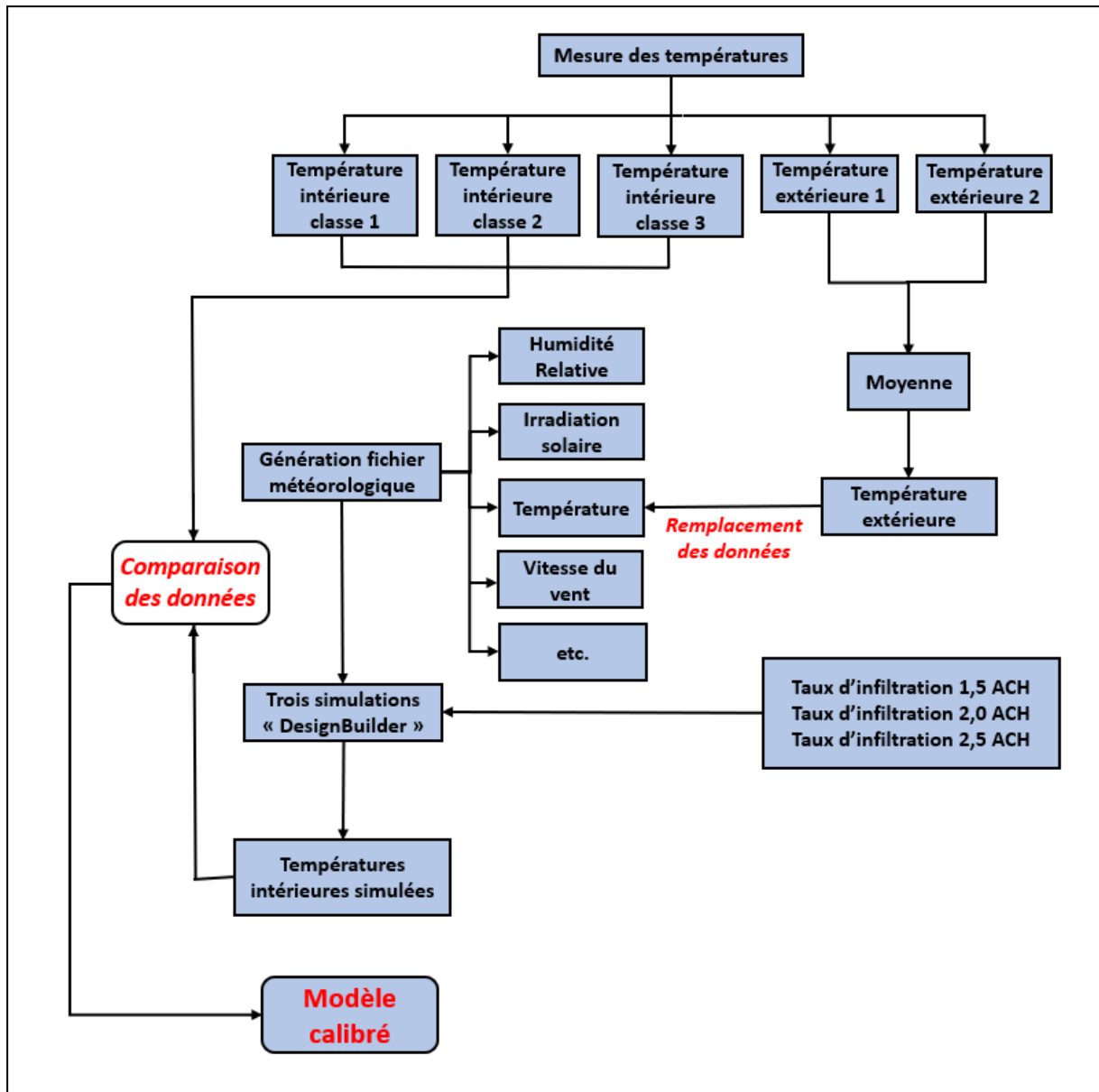


Figure 85: Diagramme du processus de calibration du modèle de simulation

Le diagramme de la Figure 85 illustre le processus de calibration suivi dans cette étude.

Afin de minimiser les causes d’incertitudes, les valeurs mesurées de la température extérieure (moyennes de deux points de mesures) ont été substituées aux valeurs du fichier météorologique utilisé pour la simulation et généré par le logiciel Meteonorm.

La détermination de la valeur du taux horaire d’infiltration d’air (paramètre d’entrée du modèle) conduisant au meilleur résultat de calibration a été réalisée suite à trois simulations utilisant différentes valeurs de ce taux, respectivement 1,5 ACH, 2,0 ACH et 2,5 ACH. Ces valeurs ont été sélectionnées à partir de la recherche bibliographique.

Ces simulations ont été effectuées pour le cas de base du bâtiment et le climat « actuel » (voir section 3.3.2), comportant les valeurs mesurées de la température extérieure, pour une période de trois mois, à savoir juin, juillet et août.

Les résultats de ces simulations, relatifs à la température intérieure des trois salles de classe considérées, ont été finalement comparés aux résultats de la campagne de mesures.

Le processus de calibration a été réalisé conformément aux directives de l'ASHRAE (ASHRAE, 2002), qui considèrent que le modèle de simulation thermique du bâtiment est bien étalonné si l'erreur moyenne normalisée (NMBE) et le coefficient de variation de l'erreur quadratique moyenne (CV(RMSE)) se situent dans certaines limites décrites dans le Tableau 20 ci-dessous.

Tableau 20: Critères de calibration de l'ASHRAE (ASHRAE, 2002)

Calibration mensuelle		Calibration horaire	
NMBE [%]	CV(RMSE) [%]	NMBE [%]	CV(RMSE) [%]
±5	15	±10	30

L'erreur moyenne normalisée (NMBE) et le coefficient de variation de l'erreur quadratique moyenne (CV(RMSE)) peuvent être calculés à l'aide des équations (5) et (6) ci-dessous (Ruiz & Bandera, 2017):

$$NMBE = \frac{1}{\bar{m}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)}{n} \times 100 \quad (\%) \quad (5)$$

$$CV(RMSE) = \frac{1}{\bar{m}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)^2}{n}} \times 100 \quad (\%) \quad (6)$$

Où m_i est la donnée mesurée, s_i est la donnée simulée, n est le nombre de valeurs mesurées, et \bar{m} est la moyenne des données mesurées.

3.5.2 Les résultats du processus de calibration

Les Tableaux 21, 22 et 23 présentent les résultats de calibration du modèle à l'issue des simulations correspondant aux différentes valeurs considérées du paramètre d'entrée du modèle.

Tableau 21: Résultats de calibration du modèle de simulation thermique du bâtiment avec un

taux d'infiltration d'air de 1,5 ACH comparés aux critères de l'ASHRAE (ASHRAE, 2002).

	Salle de classe 1		Salle de classe 2		Salle de classe 3	
Période de calibration	Critères de Calibration					
	NMBE	CV(RMSE)	NMBE	CV(RMSE)	NMBE	CV(RMSE)
1 ^{er} Juin au 30 Juin 2021	-13,77	8,49	+0,2	4,32	+1,23	7,32
1 ^{er} Juillet au 31 Juillet 2021	-4,26	6,22	+2,95	5,05	+6,95	9,52
1 ^{er} Août au 31 Août 2021	-5,95	5,30	+4,23	5,12	+7,54	11,54
Période complète	-7,99	6,67	+2,46	4,83	+5,24	9,46
Critères ASHRAE	±10	30	±10	30	±10	30

Tableau 22: Résultats de calibration du modèle de simulation thermique du bâtiment avec un taux de renouvellement d'air de 2,0 ACH comparés aux critères de l'ASHRAE (ASHRAE, 2002).

	Salle de classe 1		Salle de classe 2		Salle de classe 3	
Période de calibration	Critères de Calibration					
	NMBE	CV(RMSE)	NMBE	CV(RMSE)	NMBE	CV(RMSE)
1 ^{er} Juin au 30 Juin 2021	-1,45	5,29	+1,69	4,84	+0,63	3,99
1 ^{er} Juillet au 31 Juillet 2021	+1,88	4,41	+4,07	5,75	+4,88	5,90
1 ^{er} Août au 31 Août 2021	+2,49	4,42	+4,46	5,91	+5,63	6,34
Période complète	+0,97	4,70	+3,40	5,50	+3,71	5,41
Critères ASHRAE	±10	30	±10	30	±10	30

Tableau 23: Résultats de calibration du modèle de simulation thermique du bâtiment avec un

taux de renouvellement d'air de 2,5 ACH comparés aux critères de l'ASHRAE (ASHRAE, 2002).

	Salle de classe 1		Salle de classe 2		Salle de classe 3	
Période de calibration	Critères de Calibration					
	NMBE [%]	CV(RMSE) [%]	NMBE [%]	CV(RMSE) [%]	NMBE [%]	CV(RMSE) [%]
1 ^{er} Juin au 30 Juin 2021	+2,95	8,82	+2,91	7,61	+1,34	4,66
1 ^{er} Juillet au 31 Juillet 2021	+3,86	7,36	+8,62	9,34	+5,61	6,80
1 ^{er} Août au 31 Août 2021	+4,31	7,13	+6,34	6,84	+6,94	7,69
Période complète	+3,70	7,77	+5,95	7,93	+4,63	6,38
Critères ASHRAE	±10	30	±10	30	±10	30

Les résultats indiquent que les valeurs de l'erreur moyenne normalisée (NMBE) et du coefficient de variation de l'erreur quadratique moyenne (CV(RMSE)) pour chaque salle de classe et chaque période demeurent globalement dans la plage acceptable des critères de l'ASHRAE (ASHRAE, 2002).

Cependant, il est noté des écarts relativement importants entre les trois salles de classe et entre les trois périodes mensuelles dans le cas du taux d'infiltration de 1,5 ACH (Tableau 21).

Le cas le plus favorable correspond au taux d'infiltration d'air dans les conditions normales de pression de 2,0 ACH et conduisant aux valeurs minimales de l'erreur moyenne normalisée (NMBE) et du coefficient de variation de l'erreur quadratique moyenne (CV(RMSE)) (Tableau 22). Ainsi, l'utilisation de cette valeur comme paramètre d'entrée du modèle permettra de reproduire de manière plus précise le comportement thermique du bâtiment étudié. La Figure 86 présente les résultats de la comparaison de l'évolution des températures intérieures mesurées et simulées pour une des classes et pour la valeur retenue du taux d'infiltration d'air (étanchéité à l'air du bâtiment) à l'issue du processus de calibration du modèle. Il apparaît globalement une adéquation tendancielle entre les deux courbes avec cependant un faible biais systématique (inférieur) de la température simulée pour les périodes les plus chaudes (juillet et août).

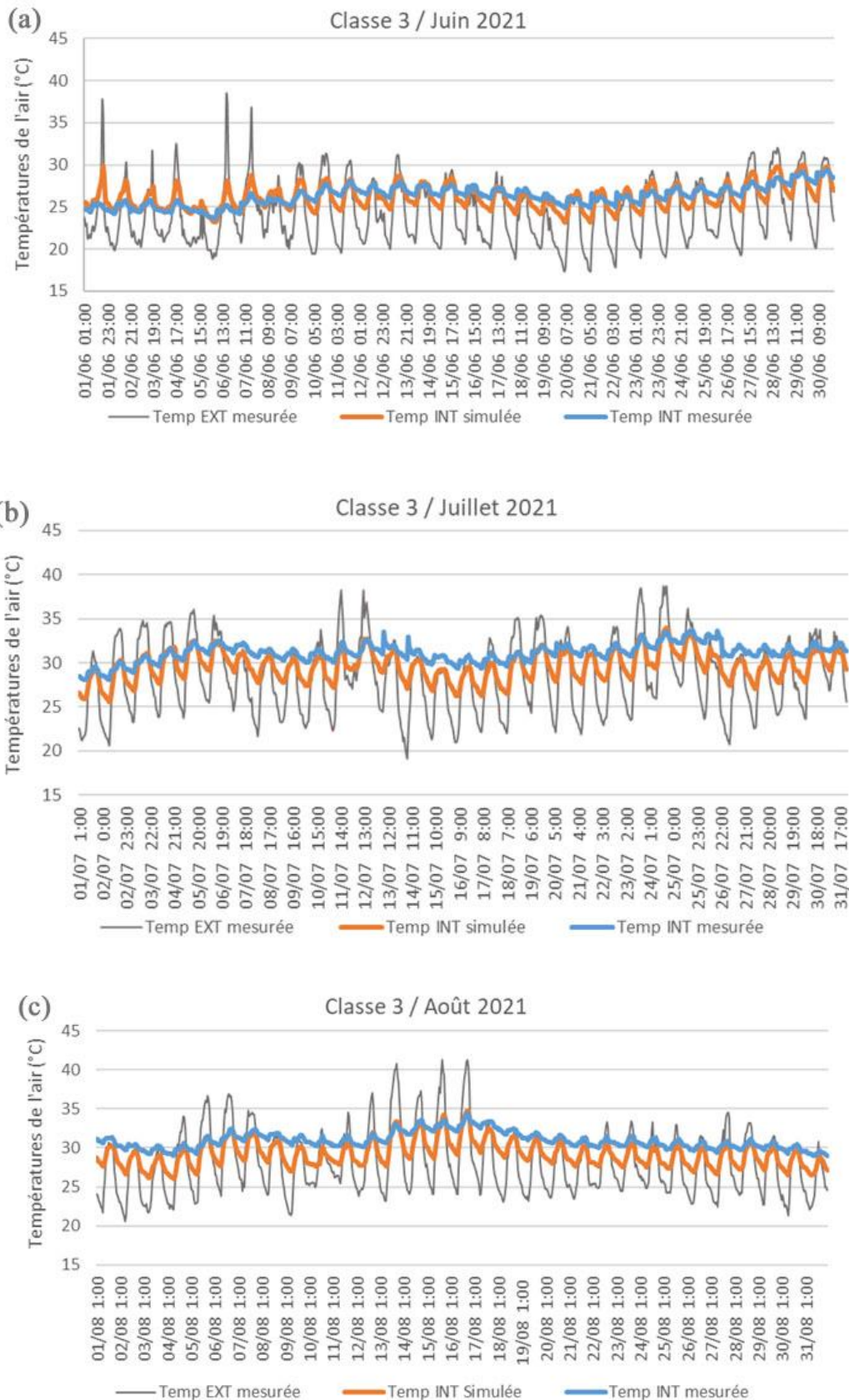


Figure 86: Comparaison de l'évolution des températures intérieures mesurées et simulées de la salle de classe 3 pour la valeur retenue du paramètre d'entrée du modèle à l'issue du processus de calibration et pour chaque période de la campagne de mesures

Conclusion

Le présent chapitre a présenté la méthodologie scientifique utilisée dans cette thèse pour étudier les impacts du changement climatique et évaluer les mesures d'adaptation des bâtiments. Une attention particulière a été portée aux bâtiments éducatifs, vu leur rôle clé dans la sensibilisation et l'éducation des générations futures. En sélectionnant un cas d'étude spécifique, il a permis une analyse approfondie des conséquences du changement climatique dans une région caractérisée par un climat méditerranéen. La génération des climats « futurs » a été réalisée en utilisant des données fiables, des modèles climatiques reconnus et des scénarios d'émissions pertinents. Ainsi, différentes mesures d'adaptation du bâtiment étudié ont été définies, conduisant à de nombreuses variantes de simulation, physiques et climatiques.

Le processus de calibration et de simulation du modèle a été effectué avec rigueur afin de garantir des résultats précis et valides. De plus, les différentes mesures d'adaptation ont été soigneusement évaluées pour déterminer leur efficacité potentielle dans l'atténuation des impacts du changement climatique. En adoptant cette méthodologie rigoureuse, cette étude renforce la crédibilité des conclusions tirées et fournit une base solide pour formuler des recommandations adaptées afin de faire face aux défis du changement climatique dans le cas d'étude spécifique et dans d'autres contextes similaires.

Les résultats des différentes simulations décrites dans le présent chapitre et effectuées à l'issue du processus de calibration du modèle de simulation sont analysés dans le chapitre suivant. Ces simulations permettent d'évaluer la pertinence et l'efficacité des mesures d'adaptation du bâtiment proposées dans le présent chapitre.

Chapitre IV

Analyse des résultats de simulation

Dans le but d'évaluer la pertinence et l'efficacité des différentes mesures d'adaptation définies dans le chapitre précédent, dans le cas du climat « actuel » et de climats « futurs », toutes les variantes de simulation décrites précédemment ont été effectuées après calibration du modèle de simulation.

Les résultats de ces simulations, représentés par la demande énergétique annuelle du bâtiment étudié, respectivement pour son chauffage et son refroidissement, sont analysés dans le présent chapitre. Il s'agit d'évaluer l'impact des mesures d'adaptation proposées sur cette demande énergétique, notamment par rapport aux critères du standard EnerPHit de rénovation énergétique des bâtiments existants (Passive House Institute, 2023).

4.1 Impact du changement climatique futur sur la demande énergétique du bâtiment existant (sans mesures d'adaptation)

Cette section présente les résultats relatifs à l'impact du changement climatique sur la demande énergétique annuelle par unité de surface du bâtiment existant, sans introduction de mesures d'adaptation. La Figure 87 et le Tableau 24 présentent l'évolution et le taux de variation de la demande énergétique du bâtiment existant entre le climat « actuel » et les climats « futurs » 2050 et 2080 pour les deux scénarios d'émission RCP4.5 et RCP8.5.

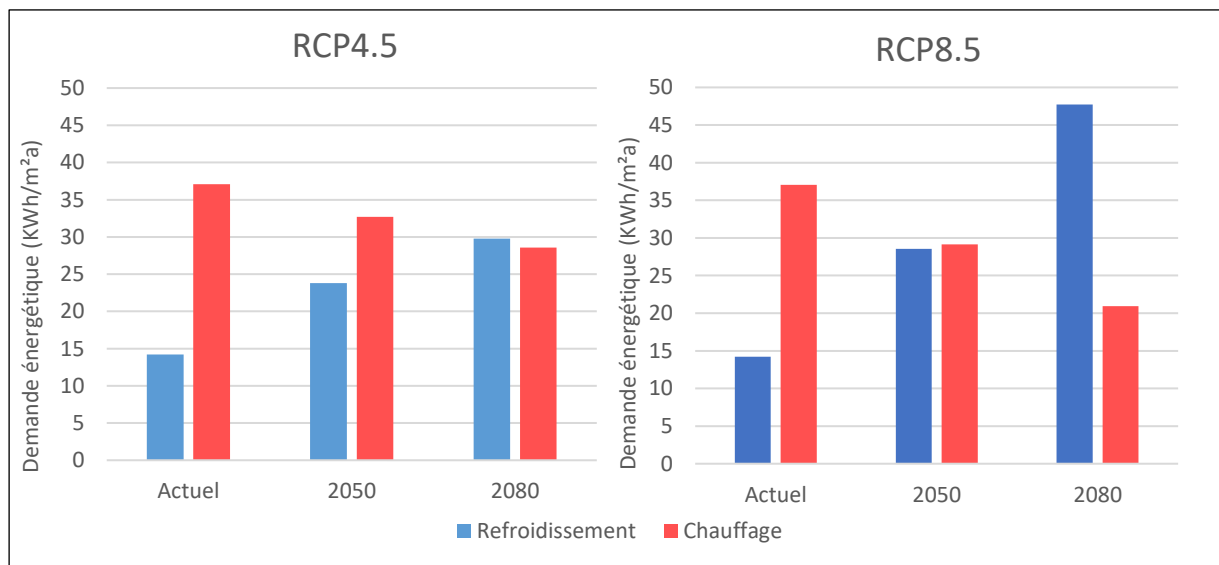


Figure 87: Évolution de la demande énergétique de chauffage et de refroidissement du bâtiment existant (sans mesures d'adaptation) entre le climat « actuel » et les climats « futurs » 2050 et 2080 pour les deux scénarios d'émission RCP4.5 et RCP8.5

Tableau 24: Taux de variation de la demande énergétique de chauffage et de refroidissement du bâtiment existant (sans mesures d'adaptation) entre le climat « actuel » et les climats « futurs » 2050 et 2080 pour les deux scénarios d'émission RCP4.5 et RCP8.5

Demande énergétique	Cible EnerPHit	Climat « actuel »	Climats « futurs »			
			RCP4.5		RCP8.5	
			2050	2080	2050	2080
Chauffage [kWh/(m ² .an)]	20,00	37,07	32,68	28,58	29,13	20,93
Taux de variation	-	-	-11,84%	-22,90%	-21,42%	-43,54%
Refroidissement [kWh/(m ² .an)]	15,00	14,21	23,82	29,79	28,53	47,73
Taux de variation	-	-	+67,63%	+109,64%	+100,77%	+235,89%

4.1.1 Impact sur la demande énergétique de chauffage

Les résultats obtenus indiquent que, pour l'ensemble des scénarios, la demande énergétique de chauffage diminuerait en 2050 et 2080 par rapport au climat « actuel ». Les réductions des demandes énergétiques de chauffage sont moins importantes dans les scénarios d'émission les plus optimistes (RCP4.5) et plus importantes dans les scénarios les plus pessimistes (RCP8.5). Cela s'explique par le fait que les scénarios les plus pessimistes conduiront à une augmentation plus importante des températures, ce qui rendra la demande de chauffage moins importante.

Il est pertinent de noter que, dans le cadre du scénario d'émission modéré RCP4.5, la demande énergétique de chauffage devrait diminuer de 11,84 % en 2050 et de 22,90 % en 2080.

Par ailleurs, dans le cas du scénario d'émission extrême RCP8.5, la baisse de la demande énergétique de chauffage serait encore plus significative, de 21,42 % en 2050 et de 43,54 % en 2080.

Il convient de noter également que le bâtiment existant, aussi bien dans le climat « actuel » que dans les climats « futurs », n'atteint pas les critères de performance (cible) requis par le standard EnerPHit.

4.1.2 Impact sur la demande énergétique de refroidissement

Le changement climatique aura un impact significatif sur la demande d'énergie de refroidissement. Les résultats montrent une augmentation de la demande de refroidissement dans tous les cas de figure.

Dans le cadre du scénario d'émission RCP4.5, la demande d'énergie de refroidissement devrait augmenter de 67,63 % en 2050 et de 109,64 % en 2080, par rapport au climat « actuel ». Toutefois, une augmentation beaucoup plus importante de la demande d'énergie de refroidissement est prévue avec le scénario d'émission RCP8.5, avec une augmentation de 100,77 % en 2050 et de 235,89 % en 2080.

Les résultats indiquent également que le bâtiment existant est à la limite des critères de performance (cible) requis par le standard EnerPHit dans le climat « actuel », même s'il n'est pas actuellement occupé pendant les périodes les plus chaudes (saison estivale). Dans les climats « futurs », le bâtiment existant s'éloignerait significativement de ces mêmes critères.

Au vu de ces résultats, confirmant la « mal adaptation » du bâtiment étudié, aussi bien dans le climat « actuel » que dans les climats « futurs », la mise en œuvre des mesures d'adaptation proposées au chapitre III apparaissent totalement justifiées. Dans ce qui suit, la pertinence et l'efficacité de ces mesures sont évaluées par rapport à leur impact sur la demande énergétique du bâtiment étudié.

4.2 Évaluation de l'impact des mesures d'adaptation séparées

Les mesures d'adaptation séparées sont les mesures physiques mises en œuvre séparément et décrites en détail au paragraphe 3.3.2.2 de la présente thèse.

4.2.1 Impact des mesures d'adaptation séparées sur la demande énergétique de chauffage

Les Tableaux 25 et 26 présentent l'impact des mesures d'adaptation séparées sur la demande énergétique annuelle de chauffage par rapport au cas de base (bâtiment existant, sans mesures d'adaptation) pour le climat « actuel » et les climats « futurs » 2050 et 2080.

Tableau 25: Impact des mesures d'adaptation séparées (MAS) sur la demande énergétique de chauffage du bâtiment étudié pour les climats « actuel » et « futurs »

N°	Cas de base & Mesures d'adaptation séparées	Demande énergétique de chauffage [kWh/(m ² .an)]				
		Climat « actuel »	Climats « futurs »			
			RCP 4.5 2050	RCP 4.5 2080	RCP 8.5 2050	RCP 8.5 2080
-	Cas de base	37,07	32,68	28,58	29,13	20,93
MAS1	Isolation thermique par l'extérieur (ITE)	31,58	27,86	24,62	25,1	18,27
MAS2	Utilisation de fenêtres performantes (UFP)	36,62	32,31	28,29	28,8	20,72
MAS3	Amélioration de l'étanchéité à l'air (AEA)	21,21	17,8	15,09	15,38	10,36
MAS4	Introduction d'une ventilation naturelle nocturne (VNN)	37,07	32,68	28,58	29,13	20,93

MAS5	Installation de surplombs d'ombrage (OMB)	37,92	33,46	29,31	29,86	21,51
MAS6	Utilisation d'un mode hybride de conditionnement d'air (MHC)	18,26	16,15	13,87	14,27	10,12

Tableau 26: Impact des mesures d'adaptation séparées (MAS) sur la variation de la demande énergétique de chauffage par rapport au cas de base pour les climats actuel et futurs

N°	Cas de base & Mesures d'adaptation séparées	Demande énergétique de chauffage [kWh/(m².an)] & Variation				
		Climat "actuel"	Climats "futurs"			
			RCP 4.5 2050	RCP 4.5 2080	RCP 8.5 2050	RCP 8.5 2080
-	Cas de base	37,07	32,68	28,58	29,13	20,93
MAS1	Isolation thermique par l'extérieur (ITE)	-14,81%	-14,75%	-13,86%	-13,83%	-12,71%
MAS2	Utilisation de fenêtres performantes (UFP)	-1,21%	-1,13%	-1,01%	-1,13%	-1,00%
MAS3	Amélioration de l'étanchéité à l'air (AEA)	-42,78%	-45,53%	-47,20%	-47,2%	-50,50%
MAS4	Introduction d'une ventilation naturelle nocturne (VNN)	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
MAS5	Installation de surplombs d'ombrage (OMB)	+2,29%	+2,39%	+2,55%	+2,51%	+2,77%
MAS6	Utilisation d'un mode hybride de conditionnement d'air (MHC)	-50,74%	-50,58%	-51,47%	-51,01%	-51,65%

4.2.1.1 Isolation thermique par l'extérieur (ITE)

Les résultats de la simulation de cette mesure d'adaptation indiquent qu'elle entrainerait une diminution de la demande énergétique de chauffage de 14,75 % en 2050 et de 13,86 % en 2080, dans le cas du scénario d'émission modéré (RCP4.5). Elle conduirait également à une diminution de la demande énergétique de chauffage de 13,83 % en 2050 et de 12,71 % en 2080 dans le cas du scénario d'émission extrême (RCP8.5).

4.2.1.2 Utilisation de fenêtres performantes (UFP)

Les résultats de la simulation de cette mesure d'adaptation indiquent clairement que l'effet de cette mesure sur la demande énergétique est négligeable. Il est constaté que, pour le scénario d'émission RCP4.5, la demande d'énergie de chauffage pourrait diminuer de 1,13 % d'ici 2050 et de 1,01 % d'ici 2080. De même, les résultats sont similaires pour le scénario RCP8.5, avec une diminution de la demande de chauffage de 1,13 % d'ici 2050 et de 1 % d'ici 2080.

4.2.1.3 Amélioration de l'étanchéité à l'air (AEA)

La troisième mesure d'adaptation consiste à améliorer l'étanchéité à l'air du bâtiment. Selon les spécifications, cette mesure a été mise en œuvre pour atteindre un niveau d'étanchéité à l'air de 0.8 ACH₅₀. Cette valeur est inférieure à la valeur maximale requise par le standard EnerPHit qui est de 1 ACH₅₀.

Les résultats de la simulation de cette mesure montrent que l'amélioration de l'étanchéité à l'air pourrait réduire de manière très importante la demande énergétique de chauffage, de 42,78 % à 50,50 % selon le climat et le scénario d'émission considérés.

4.2.1.4 Introduction d'une ventilation naturelle nocturne (VNN)

Cette mesure d'adaptation n'a conduit à aucune variation de la demande énergétique de chauffage car en réalité elle n'est activée que pendant les périodes chaudes et de mi-saison, pendant lesquelles, il n'existe pas de demande de chauffage.

4.2.1.5 Installation de surplombs d'ombrage (OMB)

La cinquième mesure d'adaptation simulée consiste en l'installation de surplombs d'ombrage au dessus des fenêtres. Les résultats indiquent que cette mesure entraînerait une augmentation peu significative de la demande énergétique pour le chauffage, de 2,29% à 2,77% selon le climat et le scénario d'émission considérés.

4.2.1.6 Utilisation d'un mode hybride de conditionnement d'air (MHC)

Les résultats de la simulation de cette mesure montrent que l'utilisation d'un tel mode de conditionnement d'air pourrait réduire de manière très importante la demande énergétique de chauffage, de 50,58 % à 51,65 % selon le climat et le scénario d'émission considérés.

Dans le cas du scénario RCP4.5, la consommation d'énergie pour le chauffage devrait diminuer de 50,58 % et 51,47 % en 2050 et 2080 respectivement. Cependant, pour le scénario RCP8.5, la réduction serait de 51,01% en 2050 et de 51,65% en 2080.

4.2.2 Impact des mesures d'adaptation séparées (MAS) sur la demande énergétique de refroidissement

Les Tableaux 27 et 28 présentent l'impact des mesures d'adaptation séparées sur la demande énergétique annuelle de refroidissement par rapport au cas de base (bâtiment existant, sans mesures d'adaptation) pour le climat « actuel » et les climats « futurs » 2050 et 2080.

Tableau 27: Impact des mesures d'adaptation séparées (MAS) sur la demande énergétique de refroidissement du bâtiment étudié pour les climats « actuel » et « futurs »

N°	Cas de base & Mesures d'adaptation séparées	Demande énergétique de refroidissement [kWh/(m².an)]				
		Climat « actuel »	Climats « futurs »			
			RCP 4.5 2050	RCP 4.5 2080	RCP 8.5 2050	RCP 8.5 2080
-	Cas de base	14,21	23,82	29,79	28,53	47,73
MAS1	Isolation thermique par l'extérieur (ITE)	12,07	20,44	25,81	24,55	41,83
MAS2	Utilisation de fenêtres performantes (UFP)	12,98	21,99	27,68	26,45	44,93
MAS3	Amélioration de l'étanchéité à l'air (AEA)	13,93	22,76	27,74	26,75	42,08
MAS4	Introduction d'une ventilation naturelle nocturne (VNN)	13,28	22,6	28,51	27,2	46,41
MAS5	Installation de surplombs d'ombrage (OMB)	13,63	22,99	28,86	27,6	46,58
MAS6	Utilisation d'un mode hybride de conditionnement d'air (MHC)	9,91	16,01	19,83	18,97	31,03

Tableau 28: Impact des mesures d'adaptation séparées (MAS) sur la variation de la demande énergétique de refroidissement par rapport au cas de base pour les climats actuel et futurs

N°	Cas de base & Mesures d'adaptation séparées	Demande énergétique de refroidissement [kWh/(m².an)] & Variation				
		Climat « actuel »	Climats « futurs »			
			RCP 4.5 2050	RCP 4.5 2080	RCP 8.5 2050	RCP 8.5 2080
-	Cas de base	14,21	23,82	29,79	28,53	47,73
MAS1	Isolation thermique par l'extérieur (ITE)	-15,06%	-14,19%	-13,36%	-13,95%	-12,36%
MAS2	Utilisation de fenêtres performantes (UFP)	-8,66%	-7,68%	-7,08%	-7,29%	-5,87%
MAS3	Amélioration de l'étanchéité à l'air (AEA)	-1,97%	-4,45%	-6,88%	-6,24%	-11,84%
MAS4	Introduction d'une ventilation naturelle nocturne (VNN)	-6,54%	-5,12%	-4,3%	-4,66%	-2,77%
MAS5	Installation de surplombs d'ombrage (OMB)	-4,08%	-3,48%	-3,12%	-3,26%	-2,41%
MAS6	Utilisation d'un mode hybride de conditionnement d'air (MHC)	-30,26%	-32,79%	-33,43%	-33,51%	-34,99%

4.2.2.1 Isolation thermique par l'extérieur (ITE)

Les résultats de simulation de cette mesure indiquent qu'elle pourrait entraîner une diminution de la demande énergétique pour le refroidissement de 14,19 % en 2050 et de 13,36 % en 2080, pour le scénario d'émission modéré RCP4.5. Les résultats ont également révélé une diminution de la demande de refroidissement pour le scénario RCP8.5, avec une baisse respective de 13,95 % en 2050 et de 12,36 % en 2080, par rapport au cas de base.

4.2.2.2 Utilisation de fenêtres performantes (UFP)

En ce qui concerne la deuxième mesure d'adaptation impliquant le remplacement des fenêtres, les résultats indiquent qu'elle a un impact significatif sur la demande d'énergie pour le

refroidissement. Pour le scénario RCP4.5, il est observé une réduction de 7,68% et 7,08% de la demande d'énergie pour le refroidissement d'ici 2050 et 2080, respectivement. En considérant le scénario RCP8.5, la demande d'énergie de refroidissement diminuera de 7,29 % en 2050 et de 5,87% en 2080, par rapport au cas de base.

4.2.2.3 Amélioration de l'étanchéité à l'air (AEA)

Concernant cette mesure d'adaptation, les résultats de simulation montrent que l'amélioration de l'étanchéité à l'air pourrait réduire la demande d'énergie de refroidissement de 4,45% en 2050 et de 6,88% en 2080 dans le scénario d'émission modéré RCP4.5. Dans le scénario d'émission extrême RCP8.5, les résultats montrent que l'amélioration de l'étanchéité à l'air conduirait à une réduction de la demande d'énergie de refroidissement de 6,24% en 2050 et de 11,84% en 2080.

4.2.2.4 Introduction d'une ventilation naturelle nocturne (VNN)

La ventilation naturelle nocturne aurait pour effet, selon les résultats de simulation, de diminuer significativement la demande d'énergie de refroidissement dans tous les cas de figure, et plus particulièrement dans le climat « actuel ». Cette diminution varierait entre 6,54% et 2,77%, selon les climats et les scénarios d'émission considérés.

4.2.2.5 Installation de surplombs d'ombrage (OMB)

L'installation des surplombs d'ombrage aurait, selon les résultats de simulation, un impact favorable sur la demande énergétique pour le refroidissement. Dans le cas du scénario d'émission modéré RCP4.5, cette mesure permettrait de réduire la demande énergétique pour le refroidissement de 3,48% en 2050 et de 3,12% en 2080. Cette diminution serait de 3,26% en 2050 et de 2,41% en 2080 dans le cas du scénario d'émission extrême RCP8.5.

4.2.2.6 Utilisation d'un mode hybride de conditionnement d'air (MHC)

L'adoption d'une telle mesure permettrait de réduire notablement la demande énergétique pour le refroidissement du bâtiment. Cette réduction varierait de 30,26% à 34,99%, selon les climats et les scénarios d'émission considérés.

4.2.3 Efficacité des mesures d'adaptation séparées (MAS) rapportée au standard EnerPHit

La Figure 88 ci-dessous illustre l'efficacité des mesures d'adaptation séparées évaluées précédemment en comparaison avec les critères du standard EnerPHit, en matière de demande énergétique pour le chauffage et le refroidissement.

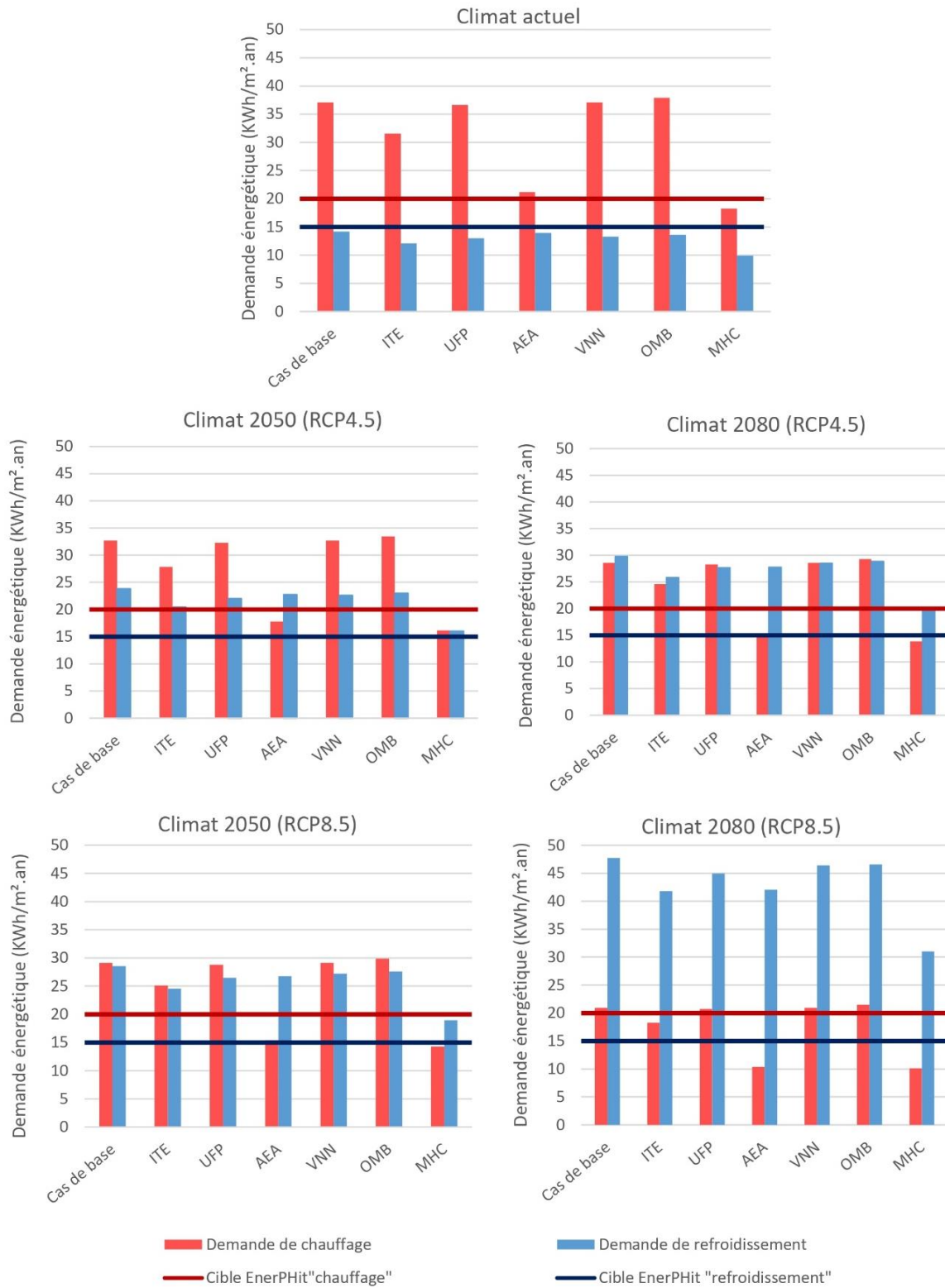


Figure 88: Efficacité des mesures d'adaptation séparées (MAS) en comparaison aux critères du standard EnerPHit, dans les climats « actuel » et « futurs »

A l'exception du climat « futur » 2080 et du scénario d'émission extrême RCP8.5, et pour la demande énergétique de chauffage, seules les mesures relatives à l'amélioration de l'étanchéité à l'air (AEA) et à l'utilisation du mode hybride de conditionnement d'air (MHC) permettraient au bâtiment étudié d'être en conformité ou quasi conformité avec le standard EnerPHit.

Dans le cas du climat « futur » 2080 et du scénario d'émission extrême RCP8.5, et pour la demande énergétique de chauffage, le bâtiment existant (cas de base) serait, sans mesure d'adaptation, quasiment conforme avec le standard EnerPHit.

4.3 Évaluation de l'impact des mesures d'adaptation cumulées

Les mêmes mesures d'adaptation séparées (MAS), précédemment décrites, ont été ensuite utilisées de manière cumulative pour simuler cinq ensembles de mesures d'adaptation cumulées, MAC1 à MAC5, décrits dans le Tableau 29 ci-dessous.

4.3.1 Impact des mesures d'adaptation cumulées sur la demande énergétique de chauffage

Les Tableaux 29 et 30 présentent les résultats des simulations correspondant aux cinq mesures d'adaptation cumulées sur la demande énergétique annuelle de chauffage par rapport au cas de base (bâtiment existant, sans mesures d'adaptation) pour le climat « actuel » et les climats « futurs » 2050 et 2080.

Tableau 29: Impact des mesures d'adaptation cumulées (MAC) sur la demande énergétique de chauffage du bâtiment étudié pour les climats « actuel » et « futurs »

N°	Cas de base & Mesures d'adaptation cumulées	Demande énergétique de chauffage [kWh/(m².an)]				
		Climat « actuel »	Climats « futurs »			
			RCP 4.5 2050	RCP 4.5 2080	RCP 8.5 2050	RCP 8.5 2080
-	Cas de base	37,07	32,68	28,58	29,13	20,93
MAC1	ITE + UFP	31,13	27,51	24,4	24,86	18,21
MAC2	ITE + UFP + AEA	13,5	11,65	10,06	10,22	7,07
MAC3	ITE + UFP + AEA + VNN	13,5	11,65	10,08	10,22	7,07
MAC4	ITE + UFP + AEA + VNN + OMB	14,01	12,08	10,44	10,62	7,36
MAC5	ITE + UFP + AEA + VNN + OMB + MHC	4,4	3,81	3,29	3,29	2,24

Tableau 30: Impact des mesures d'adaptation séparées (MAC) sur la variation de la demande énergétique de chauffage par rapport au cas de base pour les climats actuel et futurs

N°	Cas de base & Mesures d'adaptation cumulées	Demande énergétique de chauffage [kWh/(m².an)] & Variation				
		Climat « actuel »	Climats « futurs »			
			RCP 4.5 2050	RCP 4.5 2080	RCP 8.5 2050	RCP 8.5 2080
-	Cas de base	37,07	32,68	28,58	29,13	20,93
MAC1	ITE + UFP	-16,02%	-15,82%	-14,63%	-14,66%	-13,00%
MAC2	ITE + UFP + AEA	-63,58%	-64,35%	-64,80%	-64,92%	-66,22%
MAC3	ITE + UFP + AEA + VNN	-63,58%	-64,35%	-64,80%	-64,92%	-66,22%
MAC4	ITE + UFP + AEA + VNN + OMB	-62,21%	-63,04%	-63,47%	-63,54%	-64,84%
MAC5	ITE + UFP + AEA + VNN + OMB + MHC	-88,13%	-88,34%	-88,49%	-88,71%	-89,30%

La première mesure concerne le remplacement des fenêtres à simple vitrage par des fenêtres performantes à faible émissivité, combinée à une isolation renforcée des parois (ITE+UFP). Les résultats montrent une réduction significative de la demande énergétique de chauffage, jusqu'à 16,02 % dans le climat « actuel », 15,82 % pour le scénario d'émission modéré RCP4.5 en 2050 et 14,63 % en 2080. Pour le scénario d'émission extrême RCP8.5, les réductions de la demande énergétique de chauffage seraient de 14,66% en 2050 et de 13,00% en 2080.

La deuxième mesure consiste en l'amélioration de l'étanchéité à l'air du bâtiment, en plus de l'isolation des parois et du plancher supérieur, et du remplacement des fenêtres simple vitrage par des fenêtres performantes à faible émissivité (ITE+UFP+AEA). Les résultats montrent une réduction de la demande énergétique de chauffage très significative, allant jusqu'à 63,58% dans le climat « actuel », 64,35% pour le scénario d'émission modéré RCP4.5 en 2050, et 64,80% en 2080. Pour le scénario d'émission extrême RCP8.5, les résultats montrent une réduction de 64,92% en 2050 et de 66,22% en 2080.

Vu que la mesure relative à la ventilation naturelle nocturne n'est activée que pendant les périodes chaudes et de mi-saison, pendant lesquelles, il n'existe pas de demande de chauffage, la quatrième mesure ne diffère pas de la troisième en ce qui concerne la demande énergétique de chauffage.

La quatrième mesure consiste en l'installation de surplombs d'ombrage en plus des mesures précédentes (ITE+UFP+AEA+VNN+OMB). Les résultats montrent une réduction de la demande énergétique de chauffage allant jusqu'à 62,21% dans le scénario actuel, 63,04% dans le scénario RCP4.5 en 2050, et 63,47% en 2080. Dans le scénario RCP8.5, des réductions de la demande de chauffage seraient de 63,54% en 2050 et de 64,84% en 2080.

La cinquième mesure comprend toutes les mesures précédentes, ainsi que l'utilisation d'un mode hybride de conditionnement d'air (ITE+UFP+AEA+VNN+OMB+MHC). Les résultats indiquent une réduction considérable de la demande de chauffage allant jusqu'à 88,13% dans le climat « actuel », 88,34% pour le scénario d'émission modéré RCP4.5 en 2050, et 88,49% en 2080. Pour le scénario d'émission extrême RCP8.5, les réductions de la demande énergétique de chauffage seraient de 88,71% en 2050 et de 89,30% en 2080.

4.3.2 Impact des mesures d'adaptation cumulées sur la demande énergétique de refroidissement

Les Tableaux 31 et 32 présentent les résultats des simulations correspondant aux cinq mesures d'adaptation cumulées sur la demande énergétique annuelle de refroidissement par rapport au cas de base (bâtiment existant, sans mesures d'adaptation) pour le climat « actuel » et les climats « futurs » 2050 et 2080.

Tableau 31: Impact des mesures d'adaptation cumulées (MAC) sur la demande énergétique de refroidissement du bâtiment étudié pour les climats « actuel » et « futurs »

N°	Cas de base & Mesures d'adaptation cumulées	Demande énergétique de refroidissement [kWh/(m².an)]				
		Climat « actuel »	Climats « futurs »			
			RCP 4.5 2050	RCP 4.5 2080	RCP 8.5 2050	RCP 8.5 2080
-	Cas de base	14,21	23,82	29,79	28,53	47,73
MAC1	ITE + UFP	10,1	17,59	22,48	21,31	37,37
MAC2	ITE + UFP + AEA	9,54	15,46	19,24	18,36	30,14
MAC3	ITE + UFP + AEA + VNN	8,44	14,62	18,63	17,65	30,62
MAC4	ITE + UFP + AEA + VNN + OMB	8,11	14,16	18,1	17,14	29,98
MAC5	ITE + UFP + AEA + VNN + OMB + MHC	3,07	5,43	6,74	6,64	12,68

Tableau 32: Impact des mesures d'adaptation cumulées (MAC) sur la variation de la demande énergétique de refroidissement par rapport au cas de base pour les climats actuel et futurs

N°	Cas de base & Mesures d'adaptation cumulées	Demande énergétique de refroidissement [kWh/(m².an)] & Variation				
		Climat « actuel »	Climats « futurs »			
			RCP 4.5 2050	RCP 4.5 2080	RCP 8.5 2050	RCP 8.5 2080
-	Cas de base	14,21	23,82	29,79	28,53	47,73
MAC1	ITE + UFP	-28,92%	-26,15%	-24,54%	-25,31%	-21,71%
MAC2	ITE + UFP + AEA	-32,86%	-35,10%	-35,41%	-35,65%	-36,85%
MAC3	ITE + UFP + AEA + VNN	-40,61%	-38,62%	-37,46%	-38,14%	-35,85%
MAC4	ITE + UFP + AEA + VNN + OMB	-42,93%	-40,55%	-39,24%	-39,92%	-37,19%
MAC5	ITE + UFP + AEA + VNN + OMB + MHC	-78,40%	-77,20%	-77,37%	-76,73%	-73,43%

La première mesure concerne le remplacement des fenêtres à simple vitrage par des fenêtres performantes à faible émissivité, combinée à une isolation renforcée des parois (ITE+UFP). Les résultats montrent une réduction significative de la demande énergétique de refroidissement, jusqu'à 28,92% dans le climat « actuel », 26,15% pour le scénario d'émission modéré RCP4.5 en 2050 et 24,54% en 2080. Pour le scénario d'émission extrême RCP8.5, les réductions de la demande énergétique de refroidissement seraient de 25,31% en 2050 et de 21,71% en 2080.

La deuxième mesure consiste en l'amélioration de l'étanchéité à l'air du bâtiment, en plus de l'isolation thermique par l'extérieur et du remplacement des fenêtres simple vitrage par des fenêtres performantes à faible émissivité (ITE+UFP+AEA). Les résultats montrent une réduction encore plus importante de la demande énergétique de refroidissement, allant jusqu'à 32,86% dans le climat « actuel », 35,10% pour le scénario d'émission modéré RCP4.5 en 2050, et 35,41% en 2080. Pour le scénario d'émission extrême RCP8.5, les résultats montrent une réduction de 35,65% en 2050 et de 36,85% en 2080.

La mesure suivante introduit en plus une ventilation naturelle nocturne. Les résultats indiquent que cette mesure cumulée permet une réduction supplémentaire de la demande énergétique pour le refroidissement dans tous les scénarios, de 40,61% dans le climat « actuel » et, respectivement, de 38,14% en 2050 et 35,85% en 2080, dans le cas du scénario d'émission extrême RCP8.5.

La quatrième mesure consiste en l'installation de surplombs d'ombrage en plus des mesures précédentes (ITE+UFP+AEA+VNN+OMB). Les résultats montrent une réduction de la demande énergétique de refroidissement allant jusqu'à 42,93% dans le climat « actuel », 40,55% dans le scénario RCP4.5 en 2050, et 39,24% en 2080. Dans le scénario RCP8.5, des réductions de la demande de chauffage seraient de 39,92% en 2050 et de 37,19% en 2080.

La cinquième mesure comprend toutes les mesures précédentes, ainsi que l'utilisation d'un mode hybride de conditionnement d'air (ITE+UFP+AEA+VNN+OMB+MHC). Les résultats indiquent une réduction considérable de la demande de refroidissement allant jusqu'à 78,40% dans le climat « actuel », 77,20% pour le scénario d'émission modéré RCP4.5 en 2050, et 77,37% en 2080. Pour le scénario d'émission extrême RCP8.5, les réductions de la demande énergétique de chauffage seraient de 76,73% en 2050 et de 73,43% en 2080.

4.3.3 Efficacité des mesures d'adaptation cumulées (MAC) rapportée au standard EnerPHit

La Figure 89 ci-dessous illustre l'efficacité des mesures d'adaptation cumulées évaluées précédemment en comparaison avec les critères du standard EnerPHit, en matière de demande énergétique pour le chauffage et le refroidissement.

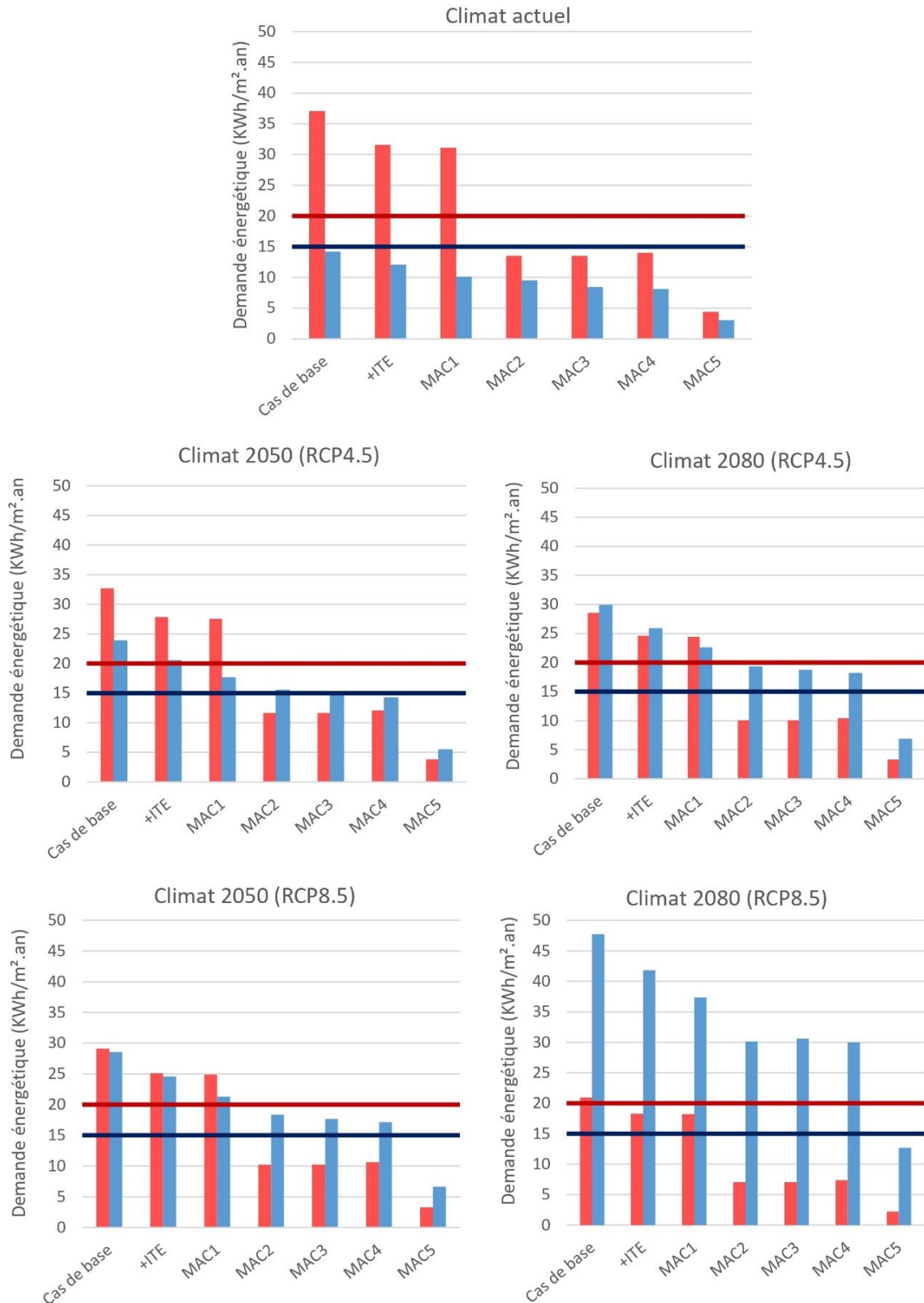


Figure 89: Efficacité des mesures d'adaptation cumulées (MAC) en comparaison aux critères du standard EnerPHit, dans les climats « actuel » et « futurs »

Les résultats indiquent que dans le climat « actuel », le bâtiment existant (cas de base) est déjà conforme aux exigences du standard EnerPHit concernant la demande énergétique de refroidissement. Dans le même climat, les mesures d'adaptation cumulées MAC2, MAC3, MAC4 et MAC5 permettraient d'être en conformité avec le standard EnerPHit relative à la demande énergétique de chauffage et réduiraient significativement la demande énergétique de refroidissement, bien au dessous des exigences du standard EnerPHit.

Dans le climat « futur » de 2050 et pour le scénario d'émission modéré RCP4.5, seules les mesures d'adaptation cumulées MAC2, MAC3, MAC4 et MAC5 permettraient d'atteindre les exigences du standard EnerPHit pour la demande énergétique de chauffage et de refroidissement.

Dans le climat « futur » de 2050, pour le scénario d'émission extrême RCP8.5, ainsi que dans le climat « futur » de 2080 et pour le scénario d'émission modéré RCP4.5, seule la mesure d'adaptation cumulée MAC2 à MAC5 permettrait d'atteindre les exigences du standard EnerPHit pour la demande énergétique de chauffage. Pour la demande énergétique de refroidissement, seule la mesure MAC5 permet de réaliser les exigences du standard EnerPHit avec un facteur supérieur à deux.

Concernant le climat « futur » de 2080 et le scénario d'émission extrême RCP8.5, toutes les mesures d'adaptation cumulées, à savoir MAC1 à MAC5, permettraient d'atteindre les exigences du standard EnerPHit pour la demande énergétique de chauffage, avec des facteurs proches de trois à partir de la mesure MAC2. En revanche, seule la mesure cumulée MAC5 permettrait d'atteindre les exigences du standard EnerPHit pour la demande énergétique de refroidissement.

Il est à noter que, pour tous les climats considérés, la mesure MAC5 permettrait de réduire sensiblement la demande énergétique de chauffage et de refroidissement du bâtiment étudié. Ainsi, cette mesure d'adaptation cumulée conduirait à des demandes énergétiques de chauffage et de refroidissement de respectivement 2,24 kWh/m²/an et 12,68 kWh/m²/an, entraînant ainsi une diminution de plus de 89% et 73% de la demande d'énergie de chauffage et de refroidissement, respectivement, par rapport au cas de base dans les mêmes conditions climatiques. Ces résultats se situent largement en dessous des limites énergétiques du standard EnerPHit pour le chauffage et le refroidissement, établies respectivement à 20 kWh/m²/an et 15 kWh/m²/an dans la zone climatique considérée.

4.4 Discussion des résultats

Six mesures d'adaptation du bâtiment étudié au changement climatique ont été simulées et évaluées séparément et cumulativement, constituant ainsi un ensemble de combinaisons de mesures dont l'efficacité est analysée dans ce chapitre.

Les simulations énergétiques ont été réalisées sous trois horizons temporels distincts : les conditions climatiques actuelles ainsi que deux projections pour les années 2050 et 2080, pour deux scénarios d'émission, l'un modéré (RCP4.5), l'autre extrême (RCP8.5).

L'analyse a porté sur la demande énergétique annuelle de chauffage et de refroidissement du bâtiment étudié, rapportée à l'unité de surface (kWh/m².an). L'efficacité des différentes mesures d'adaptation est ainsi évaluée par rapport aux critères du standard EnerPHit de rénovation énergétique des bâtiments existants.

Avec une réduction moyenne d'environ 14% de la demande énergétique, aussi bien pour le chauffage que pour le refroidissement, dans tous les climats considérés, l'isolation thermique par l'extérieur (ITE) du bâtiment étudié permettrait de réduire significativement ces demandes énergétiques. Cependant, elle ne permettrait pas d'atteindre les exigences du standard EnerPHit pour le chauffage, sauf dans le cas du climat « futur » 2080 et pour le scénario d'émission extrême RCP8.5. Ces résultats sont en accord avec les conclusions rapportées dans de nombreuses études antérieures (Frank, 2005; Nik et al., 2016; Radhi, 2009; van Hooff et al., 2016), où les chercheurs ont observé que l'isolation thermique par l'extérieur avait un impact positif sur la demande énergétique nécessaire pour le chauffage dans les conditions climatiques futures. D'autres recherches menées dans des régions où la demande énergétique pour le refroidissement est plus importante (Huang & Hwang, 2016; Nematoua et al., 2019) ont montré que l'isolation thermique par l'extérieur avait un impact significatif sur la diminution de la demande énergétique nécessaire pour le refroidissement.

Les résultats indiquent également que l'utilisation de fenêtres performantes (mesure UFP) entraînerait une légère diminution (environ 1%) de la demande énergétique pour le chauffage. Cependant, cette mesure entraînerait une diminution significative de la demande énergétique pour le refroidissement. Ces résultats concordent avec l'étude de Waddicor et al. (Waddicor et al., 2016), qui souligne l'impact significatif de l'amélioration des performances des fenêtres sur la réduction de la demande énergétique pour le refroidissement.

D'autre part, l'amélioration de l'étanchéité à l'air du bâtiment a un impact significatif sur la réduction de la demande énergétique pour le chauffage et pour le refroidissement, bien que son effet sur la demande d'énergie de chauffage soit beaucoup plus important que celui sur la demande d'énergie de refroidissement. L'étude a également montré qu'en moyenne, cette mesure réduirait la demande d'énergie de chauffage de 47% et la demande d'énergie de refroidissement de 7%. Cette mesure permettrait d'atteindre les exigences établies par le standard EnerPHit dans le climat « actuel » ainsi que dans les climats « futurs » de 2050 et 2080 pour le scénario d'émission RCP4.5 et pour le climat de 2050 pour le scénario d'émission extrême RCP8.5. Ces résultats sont cohérents avec ceux rapportés dans l'étude de Pérez-Andreu et al. (Pérez-Andreu et al., 2018), qui ont démontré que la réduction des taux d'infiltration d'air ont le plus grand impact sur la demande totale d'énergie. Ils suggèrent que l'amélioration de l'étanchéité à l'air peut être une mesure rentable pour réduire la consommation d'énergie de chauffage et les émissions de gaz à effet de serre, en limitant les pertes de chaleur causées par les infiltrations d'air parasites. Cette mesure d'adaptation est particulièrement pertinente pour les bâtiments anciens, dont l'enveloppe est souvent peu étanche à l'air.

Dans tous les scénarios climatiques considérés, l'introduction de la ventilation naturelle nocturne pendant les saisons chaudes et tempérées n'affecte pas la demande de chauffage, étant donné que cette demande survient à d'autres périodes. Cependant, la ventilation nocturne permet de réduire la demande de refroidissement. Néanmoins, cet impact diminue avec l'augmentation de l'importance du changement climatique, en raison de l'élévation de la température extérieure qui limite le rafraîchissement de l'espace intérieur. Bien que la ventilation nocturne ne permette qu'une réduction marginale de la demande d'énergie de refroidissement, elle peut néanmoins contribuer à atteindre les limites d'énergie de refroidissement du standard EnerPHit dans le cadre du scénario d'émission modéré RCP4.5 en 2050. Il convient de noter que l'impact de la ventilation nocturne sur la demande de refroidissement dépend de nombreux facteurs tels que la conception du bâtiment, les conditions climatiques locales et l'utilisation du bâtiment. Ces résultats mettent en évidence l'importance de prendre en compte les variations climatiques futures dans la conception de stratégies de ventilation nocturne afin de s'assurer de leur efficacité à long terme.

Les surplombs d'ombrage ont un effet sur la demande énergétique du bâtiment, qui dépend de leur capacité à arrêter le rayonnement solaire direct. En réduisant l'exposition directe des fenêtres au rayonnement solaire, l'ajout de surplombs d'ombrage permet de limiter la quantité de chaleur entrant dans le bâtiment. En hiver, les surplombs peuvent bloquer la lumière solaire qui réchauffe l'espace intérieur et conduire ainsi à une augmentation de la demande d'énergie de chauffage. Cependant, en été, les surplombs peuvent réduire la demande d'énergie de refroidissement en limitant la quantité de chaleur traversant les fenêtres. Toutefois, l'impact des surplombs d'ombrage sur la consommation d'énergie peut être minime si le bâtiment est bien orienté. Dans l'étude considérée, le bâtiment a une orientation optimale, avec trois façades extérieures orientées vers le Nord, l'Est et le Sud, et trois façades intérieures donnant sur une cour intérieure, qui sont ombragées par le couloir. Ainsi, seule la façade sud requiert l'utilisation de surplombs. Par conséquent, l'impact de l'utilisation de surplombs sur la consommation d'énergie est relativement faible.

Les surplombs d'ombrage permettent de bloquer une partie du rayonnement solaire direct qui entre par les fenêtres, réduisant ainsi la chaleur qui pénètre dans le bâtiment. Cela réduit la charge thermique sur le système de refroidissement et réduit la consommation d'énergie nécessaire pour maintenir une température confortable à l'intérieur du bâtiment. Cette mesure peut être particulièrement efficace dans les zones chaudes et ensoleillées. Cependant, il convient de noter que l'efficacité de cette mesure peut dépendre de plusieurs facteurs tels que l'orientation du bâtiment, la taille des surplombs, le type de vitrage et le niveau d'ensoleillement.

Ces résultats demeurent logiques, car pendant les saisons froides, l'angle d'incidence du rayonnement solaire est bas.

L'utilisation du mode hybride de conditionnement d'air a permis la plus importante réduction de la demande d'énergie de chauffage et de refroidissement. Ce système, en utilisant la ventilation en mode mixte, permet de maintenir une température intérieure confortable entre 20

et 25°C. Il ouvre les fenêtres pour permettre l'entrée d'air frais lorsque les conditions extérieures le permettent, et les ferme lorsque ce n'est pas le cas, tout en récupérant la chaleur de l'air extrait pour diminuer la consommation d'énergie de chauffage. Cette approche globale et intégrée du système de ventilation contribue significativement à l'efficacité énergétique du bâtiment en assurant un équilibre optimal entre les demandes de chauffage et de refroidissement.

Ces résultats sont cohérents avec ceux d'autres études telles que celle de Wang et al. (Wang et al., 2017), qui ont également identifié la ventilation en mode mixte comme la mesure la plus efficace pour réduire la consommation d'énergie dans le contexte du changement climatique en 2050 et 2080 dans trois villes étudiées.

Ces résultats suggèrent que l'implémentation d'un tel système peut avoir un impact significatif sur la réduction de la demande de chauffage, en particulier lorsqu'il est combiné avec d'autres mesures d'efficacité énergétique tels que l'isolation thermique, l'étanchéité à l'air, la ventilation nocturne et les surplombs d'ombrage. De plus, elle permettrait d'atteindre les exigences du standard EnerPHit pour la demande d'énergie de refroidissement dans le scénario d'émission modéré RCP4.5 en 2080, et dans le scénario d'émission extrême RCP8.5 en 2050 et 2080, ce qui renforce l'importance de cette mesure pour répondre aux exigences énergétiques à long terme dans les bâtiments.

En outre, il a été constaté que l'utilisation d'un tel système en combinaison avec la mise en place de mesures d'étanchéité à l'air étaient plus efficaces pour réduire la demande d'énergie de chauffage que celle de refroidissement. Par ailleurs, le cumul d'autres mesures telle que le remplacement des fenêtres a eu un impact significatif sur la réduction de la demande d'énergie de refroidissement, tandis que l'isolation thermique a permis de réduire à la fois la demande d'énergie de chauffage et de refroidissement.

Enfin, les résultats de cette étude indiquent qu'afin de se conformer aux exigences du standard EnerPHit pour tous les scénarios de projection climatique, il est impératif de mettre en œuvre l'ensemble des mesures d'adaptation identifiées dans l'étude.

Il est important de noter que l'objectif principal de la mise en œuvre des mesures d'adaptation est de réduire la demande énergétique tout en améliorant le confort thermique intérieur. Par ailleurs, certaines études dans la littérature ont montré que l'ajout d'une isolation thermique pourrait augmenter le risque de surchauffe dans un bâtiment (Mulville & Stravoravdis, 2016; van Hooff et al., 2014). Des auteurs ont également mené des études sur le risque de surchauffe pour les bâtiments Passivhaus au Royaume-Uni (Fletcher et al., 2017; Foster et al., 2016; McLeod et al., 2013; Ridley et al., 2013).

Cependant, les résultats ont montré que cela n'était pas le cas pour cette étude car la demande de refroidissement serait plus importante si une surchauffe était effectivement présente. Ainsi, l'ajout d'une isolation thermique ne conduirait pas nécessairement à une surchauffe, mais il est important de considérer d'autres facteurs tels que la conception du bâtiment, l'orientation et la disposition des fenêtres pour éviter toute surchauffe potentielle.

En parallèle, des études antérieures ont indiqué que le changement climatique futur ne provoque pas de surchauffe dans la région méditerranéenne lorsqu'une isolation thermique est mise en place (Barbosa et al., 2015; Rodrigues & Fernandes, 2020). En outre, Fosas et al. (Fosas et al., 2018) ont constaté que l'effet de l'isolation thermique sur le risque de surchauffe dépend de plusieurs paramètres et que l'isolation thermique peut avoir un effet atténuateur ou aggravateur sur la surchauffe. Néanmoins, l'isolation contribue à hauteur de 5% seulement à la réponse totale de la surchauffe.

Effectivement, la présente étude montre que l'isolation thermique est un moyen efficace de réduction de la demande d'énergie pour le chauffage et le refroidissement des bâtiments. Cela est dû au fait que l'isolation thermique par l'extérieur permet de réduire les pertes de chaleur en hiver et de garder la chaleur à l'intérieur du bâtiment ; tandis qu'en été, elle permet de maintenir une température plus fraîche à l'intérieur en réduisant les apports de chaleur par rayonnement.

Ces résultats montrent qu'en utilisant une combinaison de mesures d'adaptation, il est possible de réduire considérablement la consommation d'énergie de chauffage et de refroidissement, et de contribuer ainsi à l'atténuation des GES et l'adaptation des bâtiments au le changement climatique.

Conclusion générale

Cette thèse a examiné les liens complexes entre le changement climatique et le secteur du bâtiment, en mettant l'accent sur les impacts et les mesures d'adaptation. À travers une combinaison d'analyses et de simulations dans le cadre d'une étude de cas, cette recherche a apporté des connaissances précieuses sur les défis et les possibilités d'intervention liés au changement climatique dans le domaine des bâtiments tertiaires en particulier.

L'impact du changement climatique sur les bâtiments est un enjeu majeur qui nécessite une attention particulière. Les phénomènes tels que l'augmentation des températures, les événements météorologiques extrêmes et les variations des régimes pluviométriques peuvent avoir des conséquences significatives sur la durabilité, la résilience et les performances des bâtiments.

Les fortes chaleurs peuvent entraîner une surcharge thermique des bâtiments, augmentant ainsi la demande de refroidissement. Cela peut entraîner une consommation d'énergie accrue, des pics de demande d'électricité et des coûts énergétiques plus élevés.

Cependant, il convient de souligner que l'ampleur de l'impact du changement climatique dépendra des caractéristiques du bâtiment, telles que sa localisation géographique, sa taille, son orientation et sa conception architecturale.

L'étude a souligné que le secteur du bâtiment est à la fois un contributeur significatif aux émissions de gaz à effet de serre mais aussi un secteur vulnérable aux impacts du changement climatique. L'étude a mis en évidence aussi l'urgence d'adopter des approches durables et résilientes dans la conception, la construction et la gestion des bâtiments, en tenant compte des considérations climatiques à tous les niveaux.

Le premier chapitre de cette thèse se concentre sur la compréhension du contexte du changement climatique. Ce chapitre met en évidence l'importance de ce sujet de recherche dans un contexte mondial. Le changement climatique est un phénomène complexe et multidimensionnel qui a des répercussions significatives sur notre planète. Dans ce chapitre, une définition du climat est présentée. Les composantes clés du climat sont examinées pour comprendre les variations naturelles du climat. Le concept du changement climatique est abordé en mettant en évidence son origine principalement attribuée aux activités humaines, notamment les émissions de gaz à effet de serre résultant de la combustion de combustibles fossiles.

Le deuxième chapitre de cette thèse explore la relation entre le changement climatique et le secteur du bâtiment, en mettant en évidence les principales formes d'adaptation au changement climatique ainsi que les mesures spécifiques d'adaptation des bâtiments.

Ce chapitre commence par analyser les impacts du changement climatique sur les bâtiments, notamment l'augmentation des températures, les variations des régimes pluviométriques, l'intensification des événements météorologiques extrêmes, tels que les tempêtes et les inondations. Ces facteurs climatiques peuvent avoir des conséquences significatives sur la performance, la durabilité et la résilience des bâtiments.

La présente étude se concentre spécifiquement sur l'adaptation des bâtiments à l'élévation des températures. En réponse à ces défis, diverses mesures d'adaptation sont proposées et étudiées. Ces mesures qui peuvent être mises en œuvre pour atténuer les effets néfastes de cette

augmentation sur les performances thermiques et énergétiques des bâtiments sont examinées. Celles-ci incluent l'amélioration des performances de l'enveloppe extérieure, l'adoption de techniques de refroidissement passif et l'optimisation des systèmes de ventilation afin de maintenir des conditions intérieures confortables et saines dans un contexte de températures plus élevées.

Des améliorations de l'isolation thermique, des fenêtres à haut rendement énergétique, l'amélioration de l'étanchéité à l'air ainsi que d'autres solutions similaires peuvent être mises en place pour renforcer les performances de l'enveloppe extérieure. De plus, des techniques de refroidissement passif, telles que la ventilation naturelle, l'utilisation de brise-soleils et de surplombs d'ombrage, peuvent être intégrées pour réduire la dépendance aux systèmes de climatisation actifs. Enfin, l'optimisation des systèmes de ventilation permet de maintenir un flux d'air adéquat, garantissant ainsi une bonne qualité de l'air intérieur tout en régulant la température. Ces mesures cumulées contribuent à créer des environnements intérieurs plus confortables et sains, même dans un contexte de températures élevées liées au changement climatique.

L'importance d'une approche holistique intégrant la conception, la construction et la gestion des bâtiments est soulignée pour une adaptation efficace aux changements climatiques, garantissant ainsi la durabilité et la résilience des bâtiments face à ces nouveaux défis climatiques.

Les résultats ont démontré la nécessité de repenser les pratiques actuelles et d'intégrer des solutions innovantes pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, d'améliorer la performance énergétique des bâtiments et de minimiser l'impact sur l'environnement.

Cette thèse a identifié et évalué différentes mesures d'adaptation au changement climatique dans le secteur du bâtiment et en particulier celui des bâtiments éducatifs. Parmi ces mesures, on trouve l'amélioration de l'efficacité énergétique par le biais de l'isolation thermique par l'extérieur, l'utilisation de fenêtres performantes, ainsi que l'amélioration de l'étanchéité du bâtiment. De plus, des solutions de refroidissement passif, telles que la ventilation naturelle nocturne et l'installation de surplombs d'ombrage, ont été intégrées. En outre, l'adoption de technologies innovantes pour le conditionnement de l'air ont également été considérées.

Les résultats de cette étude ont établi le degré d'efficacité de ces mesures, prises séparément et cumulativement. Cette efficacité est mesurée par rapport aux exigences du standard international de rénovation énergétique des bâtiments existants, EnerPHit, sur la base de l'évaluation de la demande énergétique du bâtiment étudié, aussi bien pour le chauffage que pour le refroidissement.

Les résultats de cette étude fournissent des informations utiles pour guider les décisions de conception, de construction et de rénovation des bâtiments dans un contexte de changement climatique.

Cependant, il convient de noter que l'étude actuelle présente certaines limites qui doivent être prises en compte. Tout d'abord, elle se concentre uniquement sur un type spécifique de bâtiment. Il est donc fortement recommandé de mener des études supplémentaires afin d'évaluer l'impact du changement climatique sur une plus large gamme de typologies de bâtiments.

De même, le cas d'étude sélectionné pour cette recherche est situé dans une zone présentant un climat méditerranéen. Il est approprié d'envisager des études de cas dans des régions de l'Algérie caractérisées par d'autres types de climats.

De plus, cette étude se base sur l'utilisation de deux scénarios d'émission du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), à savoir RCP4.5 et RCP8.5. Par conséquent, il est suggéré de mener des recherches complémentaires en incluant d'autres scénarios du GIEC afin de fournir une perspective plus complète et robuste sur les impacts du changement climatique sur les bâtiments.

En prenant en compte ces limitations, il est possible d'améliorer la compréhension des effets du changement climatique sur les bâtiments et de mieux orienter les décisions politiques et les pratiques de conception, de construction et de gestion des bâtiments face à ces défis environnementaux.

Une approche multidisciplinaire et une collaboration entre les chercheurs, les praticiens du bâtiment et les décideurs sont essentielles pour mettre en œuvre des mesures adaptées afin d'assurer la résilience et la durabilité des bâtiments dans un contexte de changement climatique.

Références bibliographiques

- ADEME (2008). *Améliorez le confort de votre maison, l'isolation thermique*. http://www.techmania.fr/Ademe_fiches/isolation.pdf
- ADEME (2013). *Découvrir les nouveaux scénarios RCP et SSP utilisés par le GIEC*. https://www.ecologie.gouv.fr/archives-presse-2012-2017/IMG/pdf/ONERC_decouvrir_scenarios_Giec.pdf
- Ahrens, C. D., & Henson, R. (2019). *Meteorology today: An introduction to weather, climate, and the environment* (12^{ème} édition). Cengage.
- Alhuwayil, W. K., Abdul Mujeebu, M., & Algarny, A. M. M. (2019). *Impact of external shading strategy on energy performance of multi-story hotel building in hot-humid climate*. *Energy*, 1166–1174. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.069>
- Ali-Toudert, F., & Weidhaus, J. (2017). *Numerical assessment and optimization of a low-energy residential building for Mediterranean and Saharan climates using a pilot project in Algeria*. *Renewable Energy*, 101, 327–346. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.043>
- Alliance HQE-GBC (2023). *La certification*. <https://www.hqegbc.org/qui-sommes-nous-alliance-hqe-gbc/la-certification-hqe/>
- Alpert, P., Krichak, S. O., Shafir, H., Haim, D., & Osetinsky, I. (2008). *Climatic trends to extremes employing regional modeling and statistical interpretation over the E. Mediterranean*. *Global and Planetary Change*, 63(2–3), 163–170. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2008.03.003>
- Amara, S., Benmoussat, A., Benyoucef, B., & Nordell, B. (2007). *Évaluation des besoins énergétiques de chauffage et climatisation d'un bâtiment pour le site de Tlemcen*. 13^{èmes} Journées Internationales de Thermique.
- Amitrano, L., Hargreaves, R., Page, I., Hennessy, K., Lee, T., Snow, M., Winton, L., Woodruff, R., & Kjellstrom, T. (2007). *An assessment of the need to adapt buildings for the unavoidable consequence of climate change*. <https://research.fit.edu/media/site-specific/researchfitedu/coast-climate-adaptation-library/australia-amp-new-zealand/australia-national/DEWR-AGO.--2007.--Australia-CC--Building-Adaptation.pdf>
- Andrić, I., Gomes, N., Pina, A., Ferrão, P., Fournier, J., Lacarrière, B., & Le Corre, O. (2016). *Modeling the long-term effect of climate change on building heat demand: Case study on a district level*. *Energy and Buildings*, 126, 77–93. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.082>
- APS (Algérie Presse Service) (2022). *Gouvernement: La Déclaration de politique générale par les chiffres*. <https://www.aps.dz/algerie/145516-gouvernement-la-declaration-de-politique-generale-par-les-chiffres>
- Arbogast, A. F. (2014). *Discovering physical geography* (Third edition). John Wiley & Sons.
- Ascione, F., Bianco, N., De Masi, R. F., Mauro, G. M., & Vanoli, G. P. (2017). *Resilience of robust cost-optimal energy retrofit of buildings to global warming: A multi-stage,*

- multi-objective approach*. Energy and Buildings, 153, 150–167.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.004>
- ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) (2002). *ASHRAE Guideline 14-2002, Measurement of Energy and Demand Savings*. 170 p.
- Asimakopoulos, D. A., Santamouris, M., Farrou, I., Laskari, M., Saliari, M., Zanis, G., Giannakidis, G., Tigas, K., Kapsomenakis, J., Douvis, C., Zerefos, S. C., Antonakaki, T., & Giannakopoulos, C. (2012). *Modelling the energy demand projection of the building sector in Greece in the 21st century*. Energy and Buildings, 49, 488–498.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.043>
- Attia, S., Gobin, C. (2020). *Climate Change Effects on Belgian Households: A Case Study of a Nearly Zero Energy Building*. Energies, 13(20), 5357. <https://doi.org/10.3390/en13205357>
- Bader, D., Covey, C., Gutowski, W., Held, I., Kunkel, K., Miller, R., Tokmakian, R., & Zhang, M. (2008). *Climate Models: An Assessment of Strengths and Limitations*. US Department of Energy Publications. <https://digitalcommons.unl.edu/usdoepub/8>
- Bakó-Biró, Zs., Clements-Croome, D. J., Kochhar, N., Awbi, H. B., & Williams, M. J. (2012). *Ventilation rates in schools and pupils' performance*. Building and Environment, 48, 215–223. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.08.018>
- Barbosa, R., Vicente, R., & Santos, R. (2015). *Climate change and thermal comfort in Southern Europe housing: A case study from Lisbon*. Building and Environment, 92, 440–451. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.05.019>
- Batier, C. (2016). *Confort thermique et énergie dans l'habitat social en milieu méditerranéen : D'un modèle comportemental de l'occupant vers des stratégies architecturales*. Thèse de doctorat. Université de Montpellier.
<https://theses.hal.science/tel-01811065/document>
- Bazazzadeh, H., Pilechiha, P., Nadolny, A., Mahdavinejad, M., & Hashemi safaei, S. sara. (2021). *The Impact Assessment of Climate Change on Building Energy Consumption in Poland*. Energies, 14(14), 4084. <https://doi.org/10.3390/en14144084>
- Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). *Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution*. Scientific Data, 5(1), 180214. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>
- Belcher, S., Hacker, J., & Powell, D. (2005). *Constructing design weather data for future climates*. Building Services Engineering Research and Technology, 26(1), 49–61.
<https://doi.org/10.1191/0143624405bt112oa>
- Berardi, U., Jafarpur, P. (2020). *Assessing the impact of climate change on building heating and cooling energy demand in Canada*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 121, 109681. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109681>
- Bienvenido-Huertas, D., Rubio-Bellido, C., Pérez-Fargallo, A., & Pulido-Arcas, J. A. (2020). *Energy saving potential in current and future world built environments based on the*

- adaptive comfort approach*. Journal of Cleaner Production, 249, 119306.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119306>
- Bienvenido-Huertas, D., Sánchez-García, D., Rubio-Bellido, C., & Oliveira, M. J. (2020). *Influence of adaptive energy saving techniques on office buildings located in cities of the Iberian Peninsula*. Sustainable Cities and Society, 53, 101944.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101944>
- Born, K., Fink, A. H., & Paeth, H. (2008). *Dry and wet periods in the northwestern Maghreb for present day and future climate conditions*. Meteorologische Zeitschrift, 17(5), 533–551. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2008/0313>
- Bouznit, M., & Pablo-Romero, M. del P. (2016). *CO₂ emission and economic growth in Algeria*. Energy Policy, 96, 93–104. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.05.036>
- Brager, G., Borgeson, S., & Lee, Y. (2007). *Summary report: control strategies for mixed-mode buildings*. 81. <https://escholarship.org/uc/item/8kp8352h>
- Cassou, C., & Masson-Delmotte, V. (2015). *Parlons climat en 30 questions*. La documentation française.
- CBE (2013). *About Mixed-Mode*. <https://cbe.berkeley.edu/mixedmode/aboutmm.html>
- Cellura, M., Guarino, F., Longo, S., & Tumminia, G. (2018). *Climate change and the building sector: Modelling and energy implications to an office building in southern Europe*. Energy for Sustainable Development, 45, 46–65.
<https://doi.org/10.1016/j.esd.2018.05.001>
- Cellura, M., Guarino, F., Longo, S., Mistretta, M., & Tumminia, G. (2017). *Effect of Climate Change on Building Performance: The Role of Ventilative Cooling*. International Building Performance Simulation Association
<https://doi.org/10.26868/25222708.2017.065>
- Central Virginia Radon (2021). *Radon Energy Recovery Ventilator System*. Central Virginia Radon. <https://www.central-va-radon.com/energy-recovery>
- Chalmers, P. (2014). *Change: Implications for Buildings*.
https://www.cisl.cam.ac.uk/system/files/documents/IPCC_AR5_Implications_for_Buildings_Briefing_WEB_EN.pdf
- Chan, A. L. S. (2011). *Developing future hourly weather files for studying the impact of climate change on building energy performance in Hong Kong*. Energy and Buildings, 43(10), 2860–2868. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.07.003>
- Charron, I. (2016). *Guide sur les scénarios climatiques: Utilisation de l'information climatique pour guider la recherche et la prise de décision en matière d'adaptation* (p. 94). Ouranos.
- Chavaillaz, Y. (2016). *La vitesse du changement climatique et ses implications sur la perception des générations futures*. Thèse de doctorat. Université Paris-Saclay.
<https://theses.hal.science/tel-01468489>

- Chisanga, C. B., Phiri, E., & Chinene, V. R. N. (2017). *Statistical Downscaling of Precipitation and Temperature Using Long Ashton Research Station Weather Generator in Zambia: A Case of Mount Makulu Agriculture Research Station*. *American Journal of Climate Change*, 06(03), 487–512.
<https://doi.org/10.4236/ajcc.2017.63025>
- Chow, D. H. C., Li, Z., & Darkwa, J. (2013). *The effectiveness of retrofitting existing public buildings in face of future climate change in the hot summer cold winter region of China*. *Energy and Buildings*, 57, 176–186.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.11.012>
- Cislaghi, M., De Michele, C., Ghezzi, A., & Rosso, R. (2005). *Statistical assessment of trends and oscillations in rainfall dynamics: Analysis of long daily Italian series*. *Atmospheric Research*, 77(1–4), 188–202.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2004.12.014>
- Clements-Croome, D. J., Awbi, H. B., Bakó-Biró, Z., Kochhar, N., & Williams, M. (2008). *Ventilation rates in schools*. *Building and Environment*, 43(3), 362–367.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.03.018>
- CNERIB (2016). Document technique réglementaire. *Réglementation thermique du bâtiment C 3.2 et C 3.4*
- Coakley, D., Raftery, P., & Keane, M. (2014). *A review of methods to match building energy simulation models to measured data*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 123–141. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.007>
- Collins, J. M. (2011). *Temperature Variability over Africa*. *Journal of Climate*, 24(14), 3649–3666. <https://doi.org/10.1175/2011JCLI3753.1>
- Collins, L., Natarajan, S., & Levermore, G. (2010). *Climate change and future energy consumption in UK housing stock*. *Building Services Engineering Research and Technology*, 31(1), 75–90. <https://doi.org/10.1177/0143624409354972>
- Curator: Hall of Art & Architecture. (2015). *Shading devices and its utilization*. Curator Hall.
<https://curatorhall.wordpress.com/tag/climate/>
- Daly, D., Cooper, P., & Ma, Z. (2014). *Implications of global warming for commercial building retrofitting in Australian cities*. *Building and Environment*, 74, 86–95.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.01.008>
- de Wilde, P., & Coley, D. (2012). *The implications of a changing climate for buildings*. *Building and Environment*, 55, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.03.014>
- Denker, A., El Hassar, S. M. K., & Groupe d'experts spécialiste en efficacité énergétique et durabilité sous la direction de Dr - Ing. Saad Baradiy. (2014). *Guide pour une construction écoénergétique en Algérie*. Deutche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.
- DesignBuilder-EnergyPlus (2019). *DesignBuilder-EnergyPlus version 6.1.0.006*.
<https://designbuilder.co.uk/>

- DGE (Direction Générale de l'Environnement) (2001), *Élaboration de la stratégie et du plan d'action national des changements climatiques, Communication nationale initiale*, Projet national ALG/98/G31, Alger, 131 p.
- Dickinson, R., & Brannon, B. (2016). *Generating future weather files for resilience*. Los Angeles, 6.
- Diffenbaugh, N. S., & Giorgi, F. (2012). *Climate change hotspots in the CMIP5 global climate model ensemble*. *Climatic Change*, 114(3–4), 813–822.
<https://doi.org/10.1007/s10584-012-0570-x>
- Dodoo, A., & Gustavsson, L. (2016). *Energy use and overheating risk of Swedish multi-storey residential buildings under different climate scenarios*. *Energy*, 97, 534–548.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.086>
- Dolarin, M., Vidrih, B., Kajfež-Bogataj, L., & Medved, S. (2010). *Predicted changes in energy demands for heating and cooling due to climate change*. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 35(1–2), 100–106.
<https://doi.org/10.1016/j.pce.2010.03.003>
- Eaufrance (2019). *Agir pour lutter contre le changement climatique | Eaufrance*.
<https://www.eaufrance.fr/agir-pour-lutter-contre-le-changement-climatique>
- Edwards, P. N. (2011). *History of climate modeling*. *WIREs Climate Change*, 2(1), 128–139.
<https://doi.org/10.1002/wcc.95>
- Effinergie (2009). *Document comparatif des labels de performance énergétique*.
https://www.effinergie.org/web/images/attach/base_doc/1413/tableau_comparatif_labels.pdf
- Effinergie (2021). *Règles techniques label BBC-Effinergie Rénovation ou Effinergie Rénovation*.
https://www.effinergie.org/web/images/attach/base_doc/2930/20230516_R%C3%A9gles%20technique.pdf
- Ekström, M., Grose, M. R., & Whetton, P. H. (2015). *An appraisal of downscaling methods used in climate change research*. *WIREs Climate Change*, 6(3), 301–319.
<https://doi.org/10.1002/wcc.339>
- Elmeddahi, Y. (2016). *Les changements climatiques et leurs impacts sur les ressources en eau, cas du bassin du Cheliff*. Thèse de doctorat. Université Hassiba Ben Bouali.
<http://dspace.univ-chlef.dz/handle/123456789/307>
- Energie Plus Le Site (2007a). *Inertie thermique*. Energie Plus Le Site.
<https://energieplus-lesite.be/theories/enveloppe9/autres-phenomenes-thermiques/inertie-thermique/>
- Energie Plus Le Site (2007b). *Résistance thermique totale d'une paroi (Rt)*. Energie Plus Le Site.
<https://energieplus-lesite.be/theories/enveloppe9/echanges-chaaleur-parois/resistance-thermique-totale-d-une-paroi-rt/>

- Energie Plus Le Site (2007c). *Ventilation naturelle*. Energie Plus Le Site. <https://energieplus-lesite.be/techniques/ventilation8/ventilation-hygienique/systemes-de-ventilation/ventilation-naturelle/>
- Energie Plus Le Site (2007d) *Degrés-jours [Théories—Climat]*. Energie Plus Le Site. <https://energieplus-lesite.be/theories/climat8/degres-jours-d2/>
- Energie Plus Le Site (2011). *Consommation en énergie primaire*. Energie Plus Le Site. <https://energieplus-lesite.be/theories/consommation-energetique/la-consommation-en-energie-primaire/>
- Energy saver (n.d.) *Whole-House Ventilation*. <https://www.energy.gov/energysaver/whole-house-ventilation>
- EnergyPlus (2018). *EnergyPlus version 8.9*. <https://energyplus.net/>
- Erba, S., Sangalli, A., & Pagliano, L. (2019). *Present and future potential of natural night ventilation in nZEBs*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 296, 012041. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/296/1/012041>
- Fabbri, K. (2015). *Indoor Thermal Comfort Perception: A Questionnaire Approach Focusing on Children*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-18651-1>
- Fatichi, S., Ivanov, V. Y., & Caporali, E. (2011). *Simulation of future climate scenarios with a weather generator*. *Advances in Water Resources*, 34(4), 448–467. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2010.12.013>
- fenetre24.be (2023). *Le coefficient K*. <https://www.fenetre24.be/info/termes-techniques/coefficient-k.php>
- Filippín, C., Flores Larsen, S., & Ricard, F. (2018). *Improvement of energy performance metrics for the retrofit of the built environment. Adaptation to climate change and mitigation of energy poverty*. *Energy and Buildings*, 165, 399–415. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.12.050>
- Fletcher, M. J., Johnston, D. K., Glew, D. W., & Parker, J. M. (2017). *An empirical evaluation of temporal overheating in an assisted living Passivhaus dwelling in the UK*. *Building and Environment*, 121, 106–118. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.05.024>
- Flickr (2022). *Frontier Supercomputer* . <https://www.flickr.com/photos/olcf/52117623843/>
- Fosas, D., Coley, D. A., Natarajan, S., Herrera, M., Fosas de Pando, M., & Ramallo-Gonzalez, A. (2018). *Mitigation versus adaptation: Does insulating dwellings increase overheating risk?* *Building and Environment*, 143, 740–759. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.07.033>
- Foster, J., Sharpe, T., Poston, A., Morgan, C., & Musau, F. (2016). *Scottish Passive House: Insights into Environmental Conditions in Monitored Passive Houses*. *Sustainability*, 8(5), 412. <https://doi.org/10.3390/su8050412>

- Foucault, A. (2009). *Climatologie et paléoclimatologie*. 323.
- Frank, Th. (2005). *Climate change impacts on building heating and cooling energy demand in Switzerland*. *Energy and Buildings*, 37(11), 1175–1185.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.06.019>
- Gercek, M., & Durmuş Arsan, Z. (2019). *Energy and environmental performance based decision support process for early design stages of residential buildings under climate change*. *Sustainable Cities and Society*, 48, 101580.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101580>
- Ghedamsi, R., Settou, N., Gouareh, A., Khamouli, A., Saifi, N., Reciou, B., & Dokkar, B. (2016). *Modeling and forecasting energy consumption for residential buildings in Algeria using bottom-up approach*. *Energy and Buildings*, 121, 309–317.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.12.030>
- Giannakopoulos, C., Hadjinicolaou, P., Zerefos, C., & Demosthenous, G. (2009). *Changing Energy Requirements in the Mediterranean Under Changing Climatic Conditions*. *Energies*, 2(4), 805–815. <https://doi.org/10.3390/en20400805>
- Giorgi, F., & Lionello, P. (2008). *Climate change projections for the Mediterranean region*. *Global and Planetary Change*, 15.
- Giorgi, F., & Mearns, L. O. (1991). *Approaches to the simulation of regional climate change: A review*. *Reviews of Geophysics*, 29(2), 191. <https://doi.org/10.1029/90RG02636>
- Givoni, B. (1978). *L'homme, l'architecture et le climat*. Paris : édition du Moniteur, 460 p.
- Google Earth (2023). <https://www.google.com/earth/>
- Goosse, H., Barriat, P. Y., Lefebvre, W., Loutre, M. F., & Zunz, V. (2010). *Introduction to climate dynamics and climate modelling*. 198 p <http://www.climate.be/textbook/>
- Harmathy, N., Magyar, Z., & Folić, R. (2016). *Multi-criterion optimization of building envelope in the function of indoor illumination quality towards overall energy performance improvement*. *Energy*, 114, 302–317.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.162>
- Hartmann, D. L. (2016). *Global physical climatology* (Second edition). Elsevier. 485 p.
- Hauglustaine, J.-M., & Simon, F. (2018). *L'isolation thermique des murs—Guide pratique pour les architectes* (Second edition). 200 p.
- Herrera, M., Natarajan, S., Coley, D. A., Kershaw, T., Ramallo-González, A. P., Eames, M., Fosas, D., & Wood, M. (2017). *A review of current and future weather data for building simulation*. *Building Services Engineering Research and Technology*, 38(5), 602–627. <https://doi.org/10.1177/0143624417705937>
- Home Expert (2022). *Le Confort Hygrothermique*. <https://home-expert.fr/le-confort-hygrothermique/>

- Huang, K.-T., & Hwang, R.-L. (2016). *Future trends of residential building cooling energy and passive adaptation measures to counteract climate change: The case of Taiwan*. Applied Energy, 184, 1230–1240. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.008>
- Hui., S. C. M. (2016). *Mechanical and Natural Ventilation*. http://ibse.hk/MECH3423/MECH3423_1516_08-ventilation.pdf
- Hulme, M., & Viner, D. (1998). *A Climate Change Scenario for the Tropics*. In A. Markham (Ed.), *Potential Impacts of Climate Change on Tropical Forest Ecosystems* (pp. 5–36). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-017-2730-3_1
- Imessad, K., Kharchi, R., Bouchaib, S., Chenak, A., Hakem, S., Hamidat, A., Larbi-youcef, S., Sami, S., & Sahnoune, F. (2017). *Mise en application de la nouvelle réglementation thermique algérienne du bâtiment*. Revue des Energies Renouvelables Vol. 591 - 597
- Invidiata, A., & Ghisi, E. (2016). *Impact of climate change on heating and cooling energy demand in houses in Brazil*. Energy and Buildings, 130, 20–32. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.067>
- IPCC (2000). *Emissions scenarios: Summary for policymakers: a special report of IPCC Working Group III*. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/sres-en.pdf>
- IPCC (2013). *AR5 Climate Change 2013: The Physical Science Basis — IPCC*. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
- IPCC (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf
- IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Jacques, G., & Le Treut, H. (2011). *Le changement climatique*. Éditions UNESCO. 158 p.
- Jafarpur, P., & Berardi, U. (2021). *Effects of climate changes on building energy demand and thermal comfort in Canadian office buildings adopting different temperature setpoints*. Journal of Building Engineering, 42, 102725. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102725>
- Jedidi, M., & Benjeddou, O. (2016). *La thermique du bâtiment du confort thermique au choix des équipements de chauffage et de climatisation*. Dunod. 208 p.
- Jentsch, M. F., James, P. A. B., Bourikas, L., & Bahaj, A. S. (2013). *Transforming existing weather data for worldwide locations to enable energy and building performance simulation under future climates*. Renewable Energy, 55, 514–524. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.12.049>
- Jylhä, K., Jokisalo, J., Ruosteenoja, K., Pilli-Sihvola, K., Kalamees, T., Seitola, T., Mäkelä, H. M., Hyvönen, R., Laapas, M., & Drebs, A. (2015). *Energy demand for the heating and cooling of residential houses in Finland in a changing climate*. Energy and Buildings, 99, 104–116. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.001>

- Kelley, C. P., Mohtadi, S., Cane, M. A., Seager, R., & Kushnir, Y. (2015). *Climate change in the Fertile Crescent and implications of the recent Syrian drought*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 112(11), 3241–3246.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1421533112>
- Kershaw, T. (2017). *Climate change resilience in the urban environment*. IOP Publishing. 28p
- Khatami, N. (2014). *Retrofitted natural ventilation systems for a lightweight office building*. [Thèse de doctorat]. Université de Loughborough.
- Kibert, C. J. (2016). *Sustainable construction: Green building design and delivery* (John Wiley&Sons). pp. 187
- Lamy, C. (2013). *Impact du changement climatique sur la fréquence et l'intensité des sécheresses en Bretagne*. 287. Thèse de doctorat. Université Rennes 2.
<https://theses.hal.science/tel-01059818/document>
- Le climat en questions (n.d.). *Comment les scénarios climatiques prennent-ils en compte les options économiques de nos sociétés ?* <https://www.climat-en-questions.fr/reponse/scenarios-climatiques-par-celine-guivarch-2/>
- Liébard, A., & De Herde, A. (2005). *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques*. Le Moniteur
- Lionello, P. (2012). *The climate of the Mediterranean region: From the past to the future* (1st ed). Elsevier
- Lionello, P., & Scarascia, L. (2018). *The relation between climate change in the Mediterranean region and global warming*. Regional Environmental Change, 18(5), 1481–1493. <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1290-1>
- Locatelli, B. (2011). *Les synergies entre adaptation et atténuation en quelques mots*. 4 p.
https://www.cifor.org/publications/pdf_files/cobambrief/3620-cobambrief.pdf
- Mata, É., Sasic Kalagasidis, A., & Johnsson, F. (2013). *Energy usage and technical potential for energy saving measures in the Swedish residential building stock*. Energy Policy, 55, 404–414. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.12.023>
- MATE (Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement) (2010). *Seconde communication nationale de l'Algérie sur les changements climatiques à la CCNUCC*.
- Mathez, E. A., & Smerdon, J. E. (2018). *Climate change: The science of global warming and our energy future* (Second edition). Columbia University Press.
- McLeod, R. S., Hopfe, C. J., & Kwan, A. (2013). *An investigation into future performance and overheating risks in Passivhaus dwellings*. Building and Environment, 70, 189–209. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.08.024>
- MEAE (Ministère de l'Europe et des Affaires étrangères) (2022). *Chronologie des négociations climat de 1988 à aujourd'hui*. France Diplomatie - Ministère de l'Europe et des Affaires étrangères. <https://www.diplomatie.gouv.fr/fr/politique-etrangere-de->

- [la-france/climat-et-environnement/la-lutte-contre-les-changements-climatiques/les-negociations-internationales-en-matiere-de-lutte-contre-les-changements/article/chronologie-des-negociations-climat-de-1988-a-aujourd-hui](https://www.mediterranean-climate-experts.org/fr/la-france/climat-et-environnement/la-lutte-contre-les-changements-climatiques/les-negociations-internationales-en-matiere-de-lutte-contre-les-changements/article/chronologie-des-negociations-climat-de-1988-a-aujourd-hui)
- MedECC (Mediterranean Experts on Climate and Environmental Change) (2020). *Climate and Environmental Change in the Mediterranean Basin – Current Situation and Risks for the Future. First Mediterranean Assessment Report* (1^{ère} Version). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.4768833>
- MEM (Ministère de l'énergie et des mines) (2022). *Bilan énergétique national 2021*. https://www.energy.gov.dz/Media/galerie/bilan_energetique_2021_63df78f2b775e.pdf
- Meteonorm (2020). *Meteonorm version 8.0.3*. <https://meteonorm.com/>
- Minergie (2023). *Règlement des labels MINERGIE®/MINERGIE-P®/MINERGIE-A®*. https://www.minergie.ch/media/230905_produktreglement_minergie_p_a_2023.1_fr.pdf
- Missoum, M., Hamidat, A., Loukarfi, L., & Abdeladim, K. (2014). *Impact of rural housing energy performance improvement on the energy balance in the North-West of Algeria*. *Energy and Buildings*, 85, 374–388. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.045>
- Moazami, A., Nik, V. M., Carlucci, S., & Geving, S. (2019). *Impacts of future weather data typology on building energy performance – Investigating long-term patterns of climate change and extreme weather conditions*. *Applied Energy*, 238, 696–720. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.085>
- Moufouma-Okia, W. (2012). *Modélisation du climat régional*. 78.
- Mourshed, M. (2016). *Climatic parameters for building energy applications: A temporal-geospatial assessment of temperature indicators*. *Renewable Energy*, 94, 55–71. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.021>
- Mulville, M., & Stravoravdis, S. (2016). *The impact of regulations on overheating risk in dwellings*. *Building Research & Information*, 44(5–6), 520–534. <https://doi.org/10.1080/09613218.2016.1153355>
- NASA (National Aeronautics and Space Administration Goddard Institute for Space Studies) (2024). *Global Annual Mean Surface Air Temperature Change*. https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v4/
- National Research Council (2010). *Advancing the science of climate change*. National Academies Press.
- NCAR. (2023). *Modeling Animations | Climate & Global Dynamics*. <https://www.cgd.ucar.edu/modeling/videos-animations.html>
- Nematchoua, M. K., Yvon, A., Kalameu, O., Asadi, S., Choudhary, R., & Reiter, S. (2019). *Impact of climate change on demands for heating and cooling energy in hospitals: An in-depth case study of six islands located in the Indian Ocean region*. *Sustainable Cities and Society*, 44, 629–645. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.10.031>

- Nicholson, S. (2001). *Climatic and environmental change in Africa during the last two centuries*. *Climate Research*, 17, 123–144. <https://doi.org/10.3354/cr017123>
- Nik, V. M., & Sasic Kalagasidis, A. (2013). *Impact study of the climate change on the energy performance of the building stock in Stockholm considering four climate uncertainties*. *Building and Environment*, 60, 291–304. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.11.005>
- Nik, V. M., Mata, E., Sasic Kalagasidis, A., & Scartezzini, J.-L. (2016). *Effective and robust energy retrofitting measures for future climatic conditions—Reduced heating demand of Swedish households*. *Energy and Buildings*, 121, 176–187. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.044>
- NOAA Climate.gov (2022). *Climate Change: Global Sea Level*. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-sea-level>
- Observatoire de l’immobilier durable (2023). *Adaptation des bâtiments au changement climatique: État des lieux*. <https://o-immobilierdurable.fr/adaptation-des-batiments-au-changement-climatique-etat-des-lieux/>
- ONU (2022). *Les incendies incontrôlés vont augmenter de 50% d’ici à 2100, avertissent des experts | ONU Info*. <https://news.un.org/fr/story/2022/02/1114982>
- Osman, M. M., & Sevinc, H. (2019). *Adaptation of climate-responsive building design strategies and resilience to climate change in the hot/arid region of Khartoum, Sudan*. *Sustainable Cities and Society*, 47, 101429. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101429>
- Pajek, L., & Košir, M. (2021). *Strategy for achieving long-term energy efficiency of European single-family buildings through passive climate adaptation*. *Applied Energy*, 297, 117116. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117116>
- Passive House Institute. (2023). *Criteria for Buildings Passive House—EnerPHit—PHI Low Energy Building*. https://passiv.de/en/03_certification/02_certification_buildings/04_enerphit/04_enerphit.htm
- Pérez-Andreu, V., Aparicio-Fernández, C., Martínez-Ibernón, A., & Vivancos, J.-L. (2018). *Impact of climate change on heating and cooling energy demand in a residential building in a Mediterranean climate*. *Energy*, 165, 63–74. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.015>
- Pierangioli, L., Cellai, G., Ferrise, R., Trombi, G., & Bindi, M. (2017). *Effectiveness of passive measures against climate change: Case studies in Central Italy*. *Building Simulation*, 10(4), 459–479. <https://doi.org/10.1007/s12273-016-0346-8>
- Poitou, J., Braconnot, P., & Masson-Delmotte, V. (2014). *Le climat: La Terre et les hommes*. EDP sciences. pp. 13

- Porritt, S. M., Cropper, P. C., Shao, L., & Goodier, C. I. (2012). *Ranking of interventions to reduce dwelling overheating during heat waves*. *Energy and Buildings*, 55, 16–27. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.01.043>
- Porritt, S., Shao, L., Cropper, P., & Goodier, C. (2011). *Adapting dwellings for heat waves*. *Sustainable Cities and Society*, 1(2), 81–90. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2011.02.004>
- Projet Vert (2021). *Perméabilité à l'air*. <https://www.projetvert.fr/infiltrometrie/permeabilite-a-lair/>
- Qian, B., Gameda, S., & Hayhoe, H. (2008). *Performance of stochastic weather generators LARS-WG and AAFC-WG for reproducing daily extremes of diverse Canadian climates*. *Climate Research*, 37, 17–33. <https://doi.org/10.3354/cr00755>
- Radhi, H. (2009). *Evaluating the potential impact of global warming on the UAE residential buildings – A contribution to reduce the CO2 emissions*. *Building and Environment*, 44(12), 2451–2462. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.04.006>
- Remund, J., Müller, S. C., Schilter, C., & Rihm, B. (2010). *The use of Meteorom weather generator for climate change studies*. EMS Annual Meeting Abstracts. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2010ems..confE.417R/abstract>
- Ren, Z., Chen, Z., & Wang, X. (2011). *Climate change adaptation pathways for Australian residential buildings*. *Building and Environment*, 46(11), 2398–2412. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.05.022>
- Ridley, I., Clarke, A., Bere, J., Altamirano, H., Lewis, S., Durdev, M., & Farr, A. (2013). *The monitored performance of the first new London dwelling certified to the Passive House standard*. *Energy and Buildings*, 63, 67–78. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.052>
- Rodrigues, E., & Fernandes, M. S. (2020). *Overheating risk in Mediterranean residential buildings: Comparison of current and future climate scenarios*. *Applied Energy*, 259, 114110. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114110>
- Rogue valley door (n.d.). *Appropriate overhang calculation*. <https://www.roguevalleydoor.com/overhang>
- Rohli, R. V., & Vega, A. J. (2018). *Climatology* (Fourth edition). Jones & Bartlett Learning. pp. 4-6
- Romm, J. J. (2016). *Climate change: What everyone needs to know*. Oxford University Press.
- Roulet, C.-A. (2004). *Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments* (1^{ère} édition). Presses Polytechniques Romandes
- Rubio-Bellido, C., Pérez-Fargallo, A., & Pulido-Arcas, J. A. (2016). *Optimization of annual energy demand in office buildings under the influence of climate change in Chile*. *Energy*, 114, 569–585. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.021>
- Ruiz, G., & Bandera, C. (2017). *Validation of Calibrated Energy Models: Common Errors*. *Energies*, 10(10), 1587. <https://doi.org/10.3390/en10101587>

- Saha, K. (2008). *The earth's atmosphere: Its physics and dynamics*. Springer.
- Salagnac, J. L. (2015). *Adaptation du cadre bâti aux conditions climatiques actuelles et futures: Le cas des canicules*. 88p. <https://cstb.hal.science/hal-01232773>
- Schleussner, C.-F., Pfliederer, P., & Fischer, E. M. (2018). *Author Correction: In the observational record half a degree matters*. *Nature Climate Change*, 8(3), 257–257. <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0055-z>
- Seddiki, M. (2017). *L'aide à la décision multicritère pour la rénovation thermique des bâtiments en maçonnerie: Cas de l'Algérie*. Thèse de doctorat. Université Mohamed-Boudiaf.
- Segovia-Kueny, S. (2009). *Enjeux du changement climatique*. AFNOR éd. pp 5-6
- Semenov, M. (2008). *Simulation of extreme weather events by a stochastic weather generator*. *Climate Research*, 35, 203–212. <https://doi.org/10.3354/cr00731>
- Semenov, M. A., & Barrow, E. M. (1997). *Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios*. Volume 35, 397–414 <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1005342632279>
- Shafer, D. D. M. (2017). *Climate Change Primer*. 43. pp. 7-8 <https://www.bourkeengineprojectllc.com/wp-content/uploads/2020/02/Climate-Change-Primer-2017.pdf>
- Shi, Y., Han, Z., Xu, Y., & Xiao, C. (2021). *Impacts of climate change on heating and cooling degree-hours over China*. *International Journal of Climatology*, 41(3), 1571–1583. <https://doi.org/10.1002/joc.6889>
- Shibuya, T., & Croxford, B. (2016). *The effect of climate change on office building energy consumption in Japan*. *Energy and Buildings*, 117, 149–159. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.02.023>
- Shourav, M. S. A., Shahid, S., Singh, B., Mohsenipour, M., Chung, E.-S., & Wang, X.-J. (2018). *Potential Impact of Climate Change on Residential Energy Consumption in Dhaka City*. *Environmental Modeling & Assessment*, 23(2), 131–140. <https://doi.org/10.1007/s10666-017-9571-5>
- Solomon, S., Intergovernmental Panel on Climate Change, & Intergovernmental Panel on Climate Change. (2007). *Climate change 2007: The physical science basis: contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Tabet-Aoul, M. (2008). *Impacts du changement climatique sur les agricultures et les ressources hydriques au Maghreb*. http://portail2.reseau-concept.net/Upload/ciheam/fichiers/Nal_n%C2%B048_-_Changement_climatique.pdf
- Takayabu, I., Kanamaru, H., Dairaku, K., Benestad, R., Storch, H. von, & Christensen, J. H. (2016). *Reconsidering the Quality and Utility of Downscaling*. *Journal of the*

- Meteorological Society of Japan. Ser. II, 94A(0), 31–45.
<https://doi.org/10.2151/jmsj.2015-042>
- Techno-Science (n.d.). *Arduino—Définition*.
<https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Arduino.html>
- Thiébaud, S., & Moatti, J.-P. (2016). *The Mediterranean region under climate change: A scientific update*. IRD éditions.
- Treut, H. L., Somerville, R., Cubasch, U., Ding, Y., Mauritzen, C., Mokssit, A., Peterson, T., Prather, M., Allen, M., Auer, I., Biercamp, J., Covey, C., Fleming, J. R., García-Herrera, R., Gleckler, P., Haigh, J., Hegerl, G. C., Isaksen, K., Jones, J., ... Griggs, D. (2007). *Historical Overview of Climate Change Science*. 36.
<https://research.birmingham.ac.uk/en/publications/historical-overview-of-climate-change-science>
- Triana, M. A., Lamberts, R., & Sassi, P. (2018). *Should we consider climate change for Brazilian social housing? Assessment of energy efficiency adaptation measures*. *Energy and Buildings*, 158, 1379–1392. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.003>
- Troup, L. (2016). *Morphing Climate Data to Simulate Building Energy Consumption*. 8.
- Trzaska, S., & Schnarr, E. (2014). *A Review of Downscaling Methods for Climate Change Projections*.
https://www.researchgate.net/publication/267097515_A_Review_of_Downscaling_Methods_for_Climate_Change_Projections
- Tsoka, S., Velikou, K., Tolika, K., & Tsikaloudaki, A. (2021). *Evaluating the Combined Effect of Climate Change and Urban Microclimate on Buildings' Heating and Cooling Energy Demand in a Mediterranean City*. *Energies*, 14(18), 5799.
<https://doi.org/10.3390/en14185799>
- Tumminia, G., Guarino, F., Longo, S., Ferraro, M., Cellura, M., & Antonucci, V. (2018). *Life cycle energy performances and environmental impacts of a prefabricated building module*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 272–283.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.059>
- Ukey, R., & Rai, A. C. (2021). *Impact of global warming on heating and cooling degree days in major Indian cities*. *Energy and Buildings*, 244, 111050.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111050>
- UNEP/MAP & Plan Bleu (2020). *State of the Environment and Development in the Mediterranean*. United Nations. <https://planbleu.org/en/soed-2020-state-of-environment-and-development-in-mediterranean/>
- UNFCCC (2015). *Contribution Prévue Déterminée au niveau National de l'Algérie*.
<https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/Alg%C3%A9rie%20-INDC-%2003%20septembre%202015.pdf>

- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2022). *Probabilistic Population Projections based on the World Population Prospects 2022*. <https://population.un.org/wpp/>
- van Hooff, T., Blocken, B., Hensen, J. L. M., & Timmermans, H. J. P. (2014). On the predicted effectiveness of climate adaptation measures for residential buildings. *Building and Environment*, 82, 300–316. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.08.027>
- van Hooff, T., Blocken, B., Timmermans, H. J. P., & Hensen, J. L. M. (2016). *Analysis of the predicted effect of passive climate adaptation measures on energy demand for cooling and heating in a residential building*. *Energy*, 94, 811–820. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.11.036>
- van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. J., & Rose, S. K. (2011). *The representative concentration pathways: An overview*. *Climatic Change*, 109(1–2), 5–31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- Vasaturo, R., van Hooff, T., Kalkman, I., Blocken, B., & van Wesemael, P. (2018). *Impact of passive climate adaptation measures and building orientation on the energy demand of a detached lightweight semi-portable building*. *Building Simulation*, 11(6), 1163–1177. <https://doi.org/10.1007/s12273-018-0470-8>
- Verichev, K., Zamorano, M., & Carpio, M. (2020). *Effects of climate change on variations in climatic zones and heating energy consumption of residential buildings in the southern Chile*. *Energy and Buildings*, 215, 109874. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109874>
- Vicente-Serrano, S. M., Lopez-Moreno, J.-I., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Sanchez-Lorenzo, A., García-Ruiz, J. M., Azorin-Molina, C., Morán-Tejeda, E., Revuelto, J., Trigo, R., Coelho, F., & Espejo, F. (2014). *Evidence of increasing drought severity caused by temperature rise in southern Europe*. *Environmental Research Letters*, 9(4), 044001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/4/044001>
- Waddicor, D. A., Fuentes, E., Sisó, L., Salom, J., Favre, B., Jiménez, C., & Azar, M. (2016). *Climate change and building ageing impact on building energy performance and mitigation measures application: A case study in Turin, northern Italy*. *Building and Environment*, 102, 13–25. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.03.003>
- Wang, H., & Chen, Q. (2014). *Impact of climate change heating and cooling energy use in buildings in the United States*. *Energy and Buildings*, 82, 428–436. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.034>
- Wang, L., Liu, X., & Brown, H. (2017). *Prediction of the impacts of climate change on energy consumption for a medium-size office building with two climate models*. *Energy and Buildings*, 157, 218–226. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.007>

- Wang, X., Chen, D., & Ren, Z. (2010). *Assessment of climate change impact on residential building heating and cooling energy requirement in Australia*. *Building and Environment*, 45(7), 1663–1682. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.01.022>
- WCRP (2022). *CMIP Phase 5 (CMIP5)—Coupled Model Intercomparison Project*. <https://wcrp-cmip.org/cmip-phase-5-cmip5/>
- Wilby, R., Charles, S., Zorita, E., Timbal, B., Whetton, P., & Mearns, L. (2004). *Guidelines for Use of Climate Scenarios Developed from Statistical Downscaling Methods*. 28.
- Wilks, D. S., & Wilby, R. L. (1999). *The weather generation game: A review of stochastic weather models*. *Progress in Physical Geography*, 29.
- WMO (World Meteorological Organization). (2016). *Frequently Asked Questions—Climate*. <https://public.wmo.int/en/about-us/frequently-asked-questions/climate>
- Wolff, E., Fung, I., Hoskins, B., Mitchell, J. F. B., Palmer, T., Santer, B., Shepherd, J., Shine, K., Solomon, S., Trenberth, K., Walsh, J., & Wuebbles, D. (2020). *Climate Change: Evidence & Causes 2020*. 36 p.
- Yassaghi, H., Mostafavi, N., & Hoque, S. (2019). *Evaluation of current and future hourly weather data intended for building designs: A Philadelphia case study*. *Energy and Buildings*, 199, 491–511. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.07.016>
- Yau, Y. H., & Hasbi, S. (2013). *A review of climate change impacts on commercial buildings and their technical services in the tropics*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 430–441. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.035>
- Yin, R., Kiliccote, S., & Piette, M. A. (2016). *Linking measurements and models in commercial buildings: A case study for model calibration and demand response strategy evaluation*. *Energy and Buildings*, 124, 222–235. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.10.042>
- Yun, G. Y. (2018). *Influences of perceived control on thermal comfort and energy use in buildings*. *Energy and Buildings*, 158, 822–830. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.044>
- Zeroual, A., Assani, A. A., Meddi, H., Bouabdelli, S., Zeroual, S., & Alkama, R. (2020). *Assessment of Projected Precipitations and Temperatures Change Signals over Algeria Based on Regional Climate Model: RCA4 Simulations*. In A. M. Negm, A. Bouderbala, H. Chenchouni, & D. Barceló (Eds.), *Water Resources in Algeria—Part I* (Vol. 97, pp. 135–159). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-52652-6>
- Zeroual, A., Assani, A. A., Meddi, M., & Alkama, R. (2018). *Assessment of climate change in Algeria from 1951 to 2098 using the Köppen–Geiger climate classification scheme*. *Climate Dynamics*, 52(1–2), 227–243. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4128-0>
- Zitoun Madani, S. (2012). *Le logement en Algérie: Programmes, enjeux et tensions*. *Confluences Méditerranée*, N°81(2), 133. <https://doi.org/10.3917/come.081.0133>

Annexes

Annexe I

Les degrés-jours de chauffage et de refroidissement

Les "degrés-jours de chauffage et de refroidissement" sont une mesure utilisée pour quantifier la demande énergétique de chauffage et de refroidissement nécessaire pour maintenir la température intérieure d'un bâtiment à un niveau confortable. Cette mesure est calculée en fonction de la différence entre la température extérieure moyenne et une température de base.

La température de base est généralement déterminée en fonction des normes climatiques et des habitudes de chauffage de la région considérée. Par exemple, une température de base typique pourrait être de 18°C.

Lorsque la température extérieure est inférieure à la température de base, les degrés-jours de chauffage s'accumulent.

L'accumulation des degrés-jours de chauffage résulte des écarts positifs entre la température extérieure et la température de référence sur une période spécifique. Cette mesure est utilisée pour évaluer la consommation d'énergie requise pour le chauffage, pour planifier les demandes énergétiques liées au chauffage, et pour effectuer des analyses comparatives de l'efficacité des systèmes de chauffage.

« Le nombre de degrés-jours d'une période de chauffage est égal au produit du nombre de jours chauffés multiplié par la différence entre la température intérieure moyenne du local considéré et la température extérieure moyenne ». (Energie Plus Le Site, 2007d)

Degrés-jours de Chauffage = nombre de jours de chauffe \times (T°base - T°extérieure).

Tout comme pour les degrés-jours de chauffage, les degrés-jours de refroidissement sont calculés en soustrayant la température de base (généralement une température confortable) de la température extérieure moyenne quotidienne. Si la température extérieure est plus élevée que la température de base, des degrés-jours de refroidissement sont attribués pour cette journée.

Degrés-jours de refroidissement = nombre de jours de froid \times (T°extérieure - T° base).

La Figure 90 illustre les degrés-jours moyens dans les pays nord-africains dont l'Algérie.

Les Figures 91 et 92 illustrent respectivement les répartitions des degrés-jours annuels de chauffage et de refroidissement à 18,3 °C.

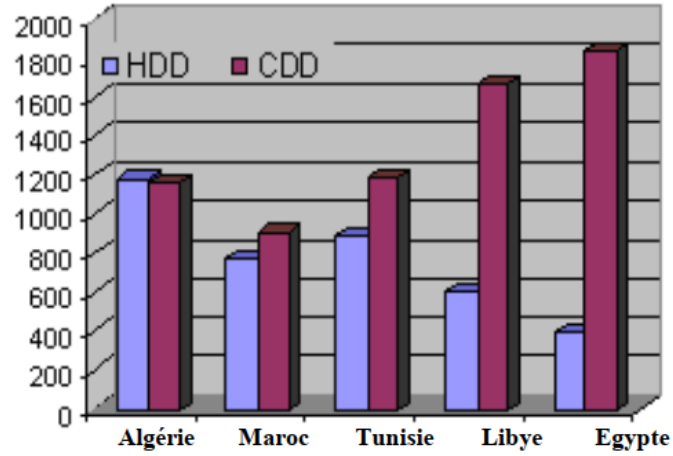


Figure 90: Degrés-jours pour le chauffage et refroidissement dans les pays d'Afrique du Nord (Amara et al., 2007)

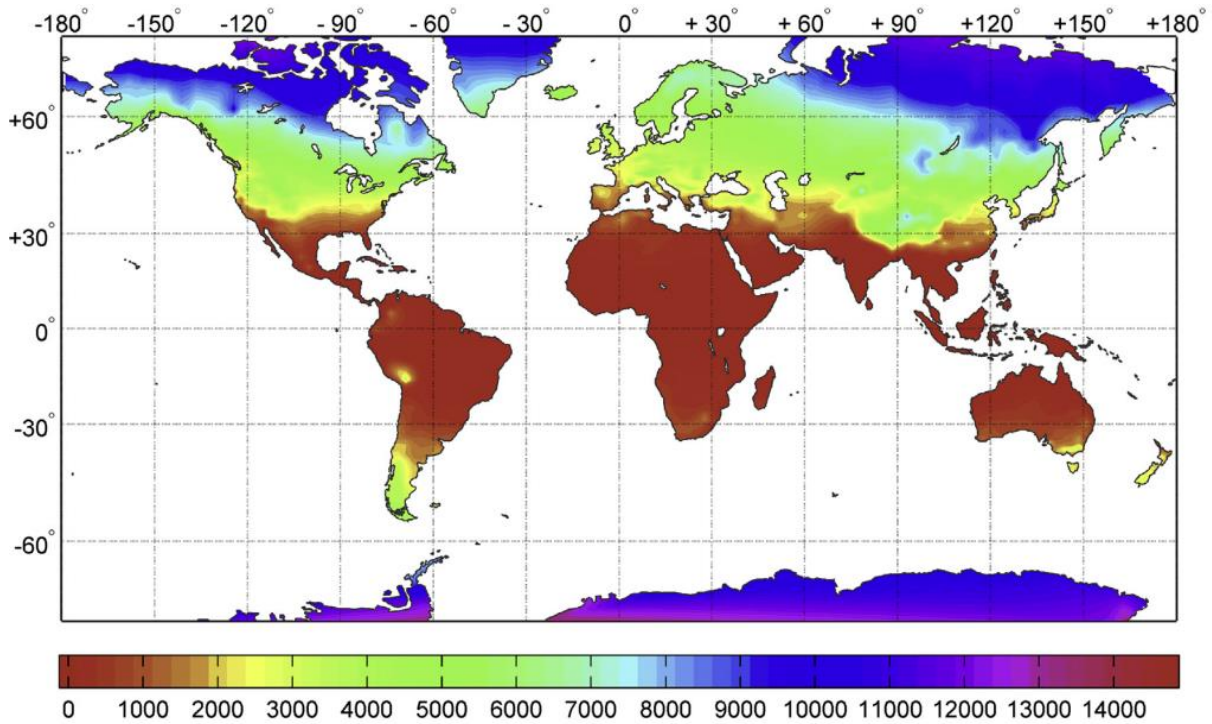


Figure 91: Répartition des degrés-jours annuels de chauffage à 18,3 °C (Mourshed, 2016)

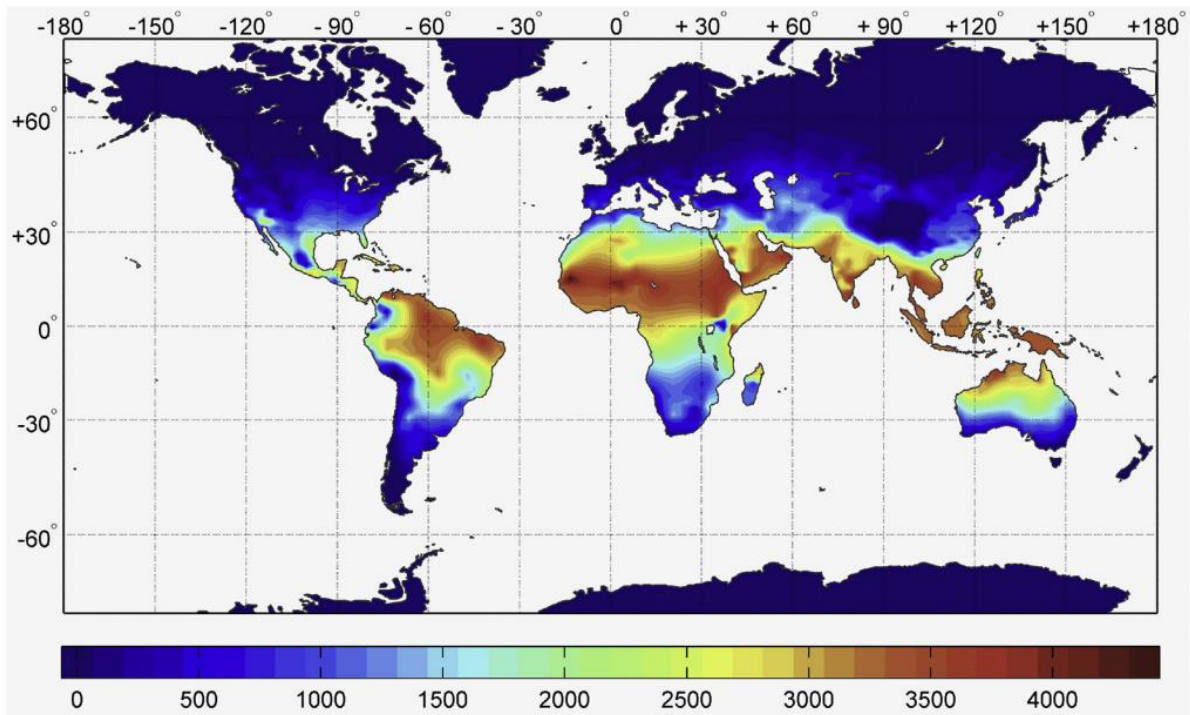


Figure 92: Répartition des degrés-jours annuels de refroidissement à 18,3 °C (Mourshed, 2016)

Annexe II

Processus de génération des fichiers EPW à l'aide du logiciel Meteonorm

1. Sélection de l'emplacement géographique

Cette étape consiste à sélectionner l'emplacement géographique pour lequel le fichier EPW doit être généré. Il s'agit de la station météorologique Tlemcen-Zenata correspondant à notre cas d'étude et figurant dans la base de données du logiciel Meteonorm.

Cette étape est particulièrement importante car les données climatiques varient considérablement en fonction de l'emplacement géographique, de sorte que la sélection de l'emplacement correct est essentielle pour l'obtention de données précises (Figure 93).

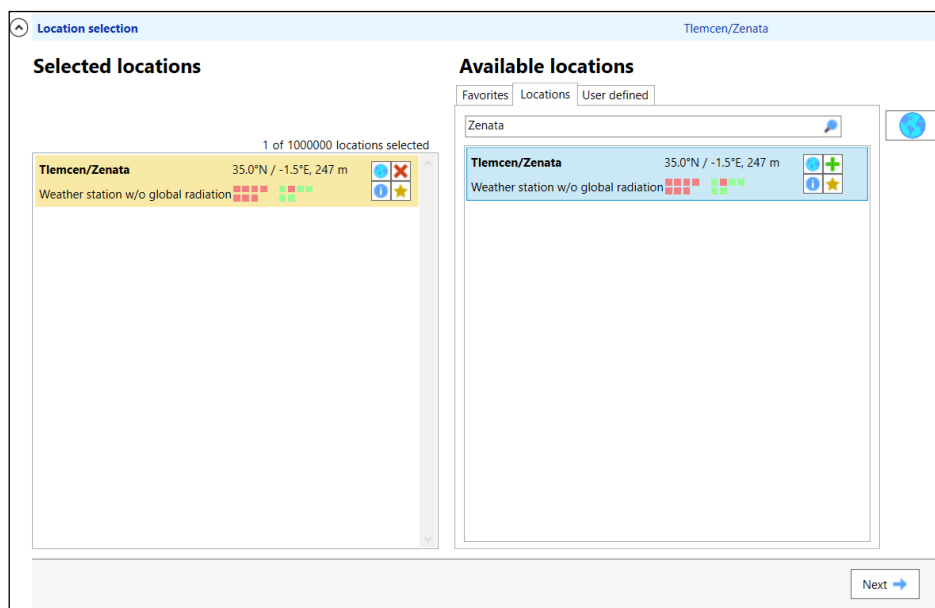


Figure 93: Sélection de la localisation dans le logiciel Meteonorm (Meteonorm, 2020)

2. Sélection des sources de données

La deuxième étape consiste à sélectionner les sources de données qui seront utilisées pour générer les données climatiques requises. Meteonorm offre la possibilité de choisir d'utiliser les données de Meteonorm, ou bien d'importer des données externes qui seront prises en compte dans la génération des données météorologiques. Cette section permet aussi de décrire les paramètres spécifiques au site sélectionné. (Figure 94).

Dans la présente étude, les données météorologiques de Meteonorm ont été utilisées pour générer les climats actuels et futurs.

Figure 94: Aperçu sur la sélection des sources de données dans le logiciel Meteonorm (Meteonorm, 2020)

3. Configuration des paramètres de l'analyse climatique

La troisième étape du processus comprend la définition d'un certain nombre de paramètres tels que la période d'analyse, le scénario climatique, l'horizon temporel, ainsi que d'autres paramètres spécifiques à la méthode d'analyse climatique utilisée (Figure 95).

Dans cette étude, le climat « actuel », dénommé « contemporain » sous Meteonorm, ainsi que les climats de 2050 et de 2080 ont été générés par rapport aux deux scénarios d'émission RCP4.5 et -RCP8.5.

Calculation settings

Calculation settings

Period

Historic
 Contemporary
 Future

Scenario for future periods

RCP 2.6
 RCP 4.5
 RCP 8.5
 Climate-fit.city RCP 4.5 (Urban heat locations only)
 Climate-fit.city RCP 8.5 (Urban heat locations only)

2020

← Back **Advanced settings** Reset Next →

Radiation model

Hour (default)
 Minute (Timeseries)
 Minute (Skartveit & Olseth)
 Minute (Hofmann)
 Clear sky radiation
 10 years
 Monthly variations

Diffuse radiation model

Perez (default)
 Boland/Ridley/Lauret (BRL)

Temperature model

Standard (hour)
 10 year extreme (hour)
 Clear sky temperature

Tilt radiation model

Perez (default)
 Hay
 Gueymard
 Skartveit & Olseth

First random seed

Automatic

Time system

Legal (default)
 Solar

Clear sky model

ESRA
 Solis 2017

Temperature - 10 year monthly extreme values

Extremas

Averages (default)
 Monthly minima
 Monthly maxima
 Yearly minima
 Yearly maxima
 Summer/Winter

Summer period

Averages (default)
 Monthly minima
 Monthly maxima

Winter period

Averages (default)
 Monthly minima
 Monthly maxima

Radiation - 10 year monthly extreme values

Extremas

Averages (default)
 Monthly minima
 Monthly maxima
 Yearly minima
 Yearly maxima
 Summer/Winter

Summer period

Averages (default)
 Monthly minima
 Monthly maxima

Winter period

Averages (default)
 Monthly minima
 Monthly maxima

Output format specific settings

WUFI Passive/WaVE

Heating loads

Time constant winter: 4
 Critical temperatures: Inside 20 °C Outside 12 °C
 Lowest average temperature over 12 hours for comfort criteria

Cooling

Number of hot days: 2
 Critical temperature: Outside 24 °C
 Night ventilation limits: Outside 21 °C Humidity 14 g/kg

Figure 95: Aperçu sur les paramètres de l'analyse climatique dans le logiciel Meteonorm (Meteonorm, 2020)

4. Sélection des options de sortie

Différents formats de sortie sont disponibles dans Meteonorm, tels que EPW, TMY2, TMY3, CSV, DAT, ainsi que des formats graphiques. Le choix du format de sortie dépend des besoins spécifiques de l'étude (Figure 96).

Dans cette étude, le logiciel DesignBuilder-EnergyPlus a été utilisé pour la simulation dynamique qui requiert des entrées sous format EnergyPlus dont l'extension est EPW.

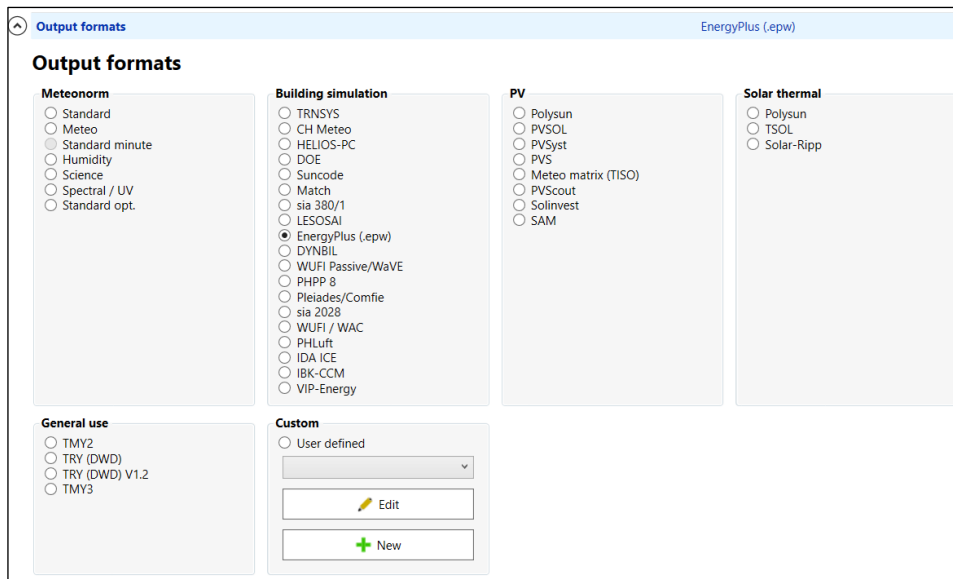


Figure 96: Aperçu sur les options de sortie dans le logiciel Meteonorm (Meteonorm, 2020)

5. Génération et exportation des résultats

Les sources de données sélectionnées sont utilisées pour produire des données climatiques pour différents paramètres tels que la température, le rayonnement, les précipitations, etc. à différents intervalles de temps (mensuel, quotidien, horaire, sub-horaire) pendant toute la période d'analyse (Figure 97). Les données climatiques générées sont ensuite exportées en incluant d'autres informations liées à la position géographique et à l'orientation du bâtiment, entre autres.

La nature de la simulation dynamique de cette étude nécessite l'utilisation des données météorologiques avec un pas de temps horaire.

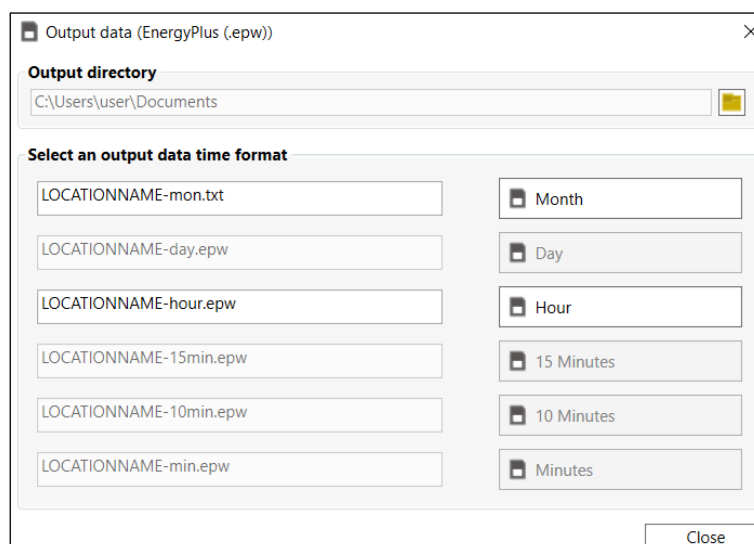


Figure 97: Aperçu des options d'exportation dans le logiciel Meteonorm (Meteonorm, 2020)

Trois salles de classe ont été choisies pour mesurer les températures intérieures. Ces salles ont été sélectionnées par rapport à leurs orientations et leurs surfaces. Le Tableau 33 montre les caractéristiques de chaque classe.

Tableau 33: Caractéristiques des salles de classe sélectionnées pour la calibration du modèle.

	Orientation	Surface (m ²)	Volume (m ³)
Salle 1	Est-Ouest	64	256
Salle 2	Nord-Sud	60	240
Salle 3	Nord-Sud	48	192

Concernant la température sèche extérieure, elle a été obtenue en moyennant les données enregistrées par deux capteurs placés à l'ombre dans des endroits différents pour minimiser l'incertitude.

Afin de calibrer le modèle, cinq points d'enregistrement ont été nécessaires (trois points intérieurs et deux extérieurs). Les instruments d'enregistrements devaient mesurer la température de manière automatique, avec un pas au moins **horaire**. Afin d'accomplir tous ces critères, la solution choisie était de composer nos propres instruments de mesures en utilisant la carte microcontrôleur programmable « Arduino » et des capteurs de températures (Annexe IV).

Annexe III

Le protocole de la campagne de mesures in-situ

La campagne de mesures a été entreprise en utilisant un dispositif spécialement conçu à cet effet (Figure 98), qui incorpore des composantes tels qu'une carte Arduino, un capteur DHT22, une carte SD et une batterie. La carte Arduino a été utilisée comme unité de contrôle pour la collecte et l'enregistrement des données. Le capteur DHT22 a été choisi pour sa capacité à mesurer précisément la température et l'humidité ambiante (Figure 99), offrant ainsi des données de qualité pour l'analyse. L'intégration d'une carte SD a permis de stocker en continu les données mesurées, garantissant l'intégrité des données et la création d'un jeu de données complet. La présence d'une batterie a été déterminante pour maintenir l'alimentation en cas de coupure électrique, assurant ainsi la continuité de la collecte de données. Cette campagne de mesures a fourni des informations précieuses sur les conditions environnementales, en exprimant la mise en synergie des capacités techniques pour répondre aux besoins scientifiques. Le code de programmation a été écrit en langage C++ par un ingénieur en automatique de l'École Supérieure en Sciences Appliquées de Tlemcen.



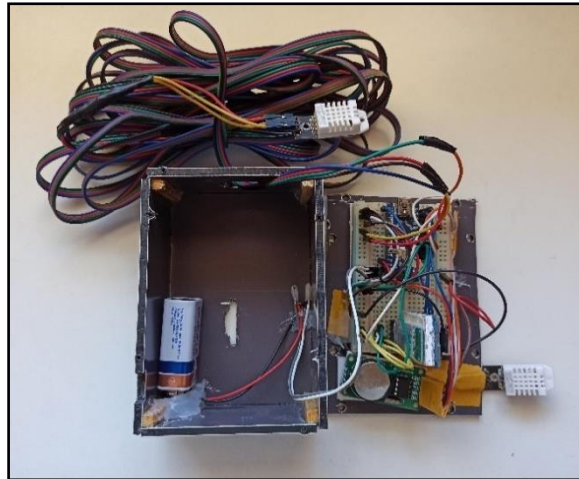


Figure 98: Photos du kit de mesure utilisé dans cette étude (source : l'auteur)

Date	Time	Humidity[%]	Temperature[°C]		dt
9/7/2021	12:38:40	50.40	31.00		10179
9/7/2021	12:38:50	50.50	31.00		10230
9/7/2021	12:39:1	50.40	31.00		10178
9/7/2021	12:39:11	50.50	31.00		10177
9/7/2021	12:39:21	50.40	31.00		10179
9/7/2021	12:39:31	50.30	31.00		10179
9/7/2021	12:39:41	50.30	31.10		10179
9/7/2021	12:39:52	50.20	31.00		10178
9/7/2021	12:40:2	50.30	31.10		10180
9/7/2021	12:40:12	50.40	31.10		10178
9/7/2021	12:40:22	50.40	31.00		10178
9/7/2021	12:40:33	50.50	31.10		10182
9/7/2021	12:40:43	50.40	31.10		10179
9/7/2021	12:40:53	50.30	31.10		10179
9/7/2021	12:41:3	50.40	31.00		10178
9/7/2021	12:41:13	50.70	31.10		10180
9/7/2021	12:41:24	50.70	31.10		10178
9/7/2021	12:41:34	50.70	31.10		10179
9/7/2021	12:41:44	50.50	31.00		10179
9/7/2021	12:41:54	50.30	31.00		10178
9/7/2021	12:42:4	50.30	31.00		10178

Figure 99: Exemple de données enregistrées par les appareils de mesures et extraites de la carte SD

Cette campagne de mesures a fourni des informations précieuses sur les conditions environnementales (Figure 100), en mettant à disposition les capacités techniques au service des besoins scientifiques.

The screenshot shows a detailed view of a METEONORM data file imported into Excel. The data is organized into several sections, each with a header row and multiple data rows. The first section includes location information (Latitude, Longitude, TimeZone, Elevation) and design conditions. The second section lists climate design data for a specific year (2013 ASHRAE Handbook). The third section provides typical/extreme periods and nearest max/min temperatures. The fourth section details ground temperature depths, ground temperature, and soil properties. The fifth section lists data periods and intervals. The sixth section contains a large block of data for a specific date (2005/1/1) at various times (00:00, 02:00, 04:00, 06:00, 08:00, 10:00, 12:00, 13:00), with columns for various meteorological parameters like Dry Bulb Temperature, Dew Point Temperature, Relative Humidity, Atmospheric Pressure, and various radiation types.

Figure 100: Aperçu des données Meteonorm ouvertes dans Microsoft Excel

Code de programmation de ce dispositif est le suivant :

```
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <virtuabotixRTC.h>
#include "DHT.h"

#define DHT1 2
#define DHT2 4
#define DHTTYPE DHT22

File myFile;

unsigned int sleepTime = 10000;
unsigned long tic, toc, dt = 0;
String fileName = "Data.txt";

DHT dht1(DHT1, DHTTYPE);
DHT dht2(DHT2, DHTTYPE);
virtuabotixRTC myRTC(6, 7, 8); // CLK DAT RST

void initSerial() {
    Serial.begin(9600);
```

```

while (!Serial) {
  // wait for serial port to connect. Needed for native USB port only
}
}

void initSD() {
  Serial.println("Initializing SD card ...");
  if (!SD.begin(10)) {
    Serial.println("Initialization failed!");
    while (1);
  }
  Serial.println("Initialization done.");
}

void displayHeaderSerial() {
  Serial.println("Date\t    Time\t    Humidity[%]\t    Temperature[°C]\t    Humidity[%]\t\nTemperature[°C]\t dt");
}

void displayHeaderSD() {
  myFile = SD.open(fileName, FILE_WRITE);

  if (myFile) {
    myFile.println("Date\t    Time\t    Humidity[%]\t    Temperature[°C]\t    Humidity[%]\t\nTemperature[°C]\t dt");
    myFile.close();
  }
  else {
    Serial.print("Error opening ");
    Serial.println(fileName);
  }
}

void writeDataSerial(float h1, float t1, float h2, float t2, unsigned long dt) {
  Serial.print(h1);
  Serial.print("\t ");

```

```
Serial.print(t1);
Serial.print("\t ");
Serial.print(h2);
Serial.print("\t ");
Serial.print(t2);
Serial.print("\t ");
Serial.println(dt);
}

void writeDataSD(float h1, float t1, float h2, float t2, unsigned long dt) {
  myFile = SD.open(fileName, FILE_WRITE);

  if (myFile) {
    myFile.print(h1);
    myFile.print("\t ");
    myFile.print(t1);
    myFile.print("\t ");
    myFile.print(h2);
    myFile.print("\t ");
    myFile.print(t2);
    myFile.print("\t ");
    myFile.println(dt);
    myFile.close();
  }
  else {
    Serial.print("Error opening ");
    Serial.println(fileName);
  }
}

void displayDateTimeSerial() {
  Serial.print(myRTC.dayofmonth);
  Serial.print("/");
  Serial.print(myRTC.month);
  Serial.print("/");
```

```
Serial.print(myRTC.year);
Serial.print("\t ");
Serial.print(myRTC.hours);
Serial.print(":");
Serial.print(myRTC.minutes);
Serial.print(":");
Serial.print(myRTC.seconds);
Serial.print("\t ");
}

void displayDateTimeSD() {
  myFile = SD.open(fileName, FILE_WRITE);
  if(myFile) {
    myFile.print(myRTC.dayofmonth);
    myFile.print("/");
    myFile.print(myRTC.month);
    myFile.print("/");
    myFile.print(myRTC.year);
    myFile.print("\t ");
    myFile.print(myRTC.hours);
    myFile.print(":");
    myFile.print(myRTC.minutes);
    myFile.print(":");
    myFile.print(myRTC.seconds);
    myFile.print("\t ");
    myFile.close();
  }
  else {
    Serial.print("Error opening ");
    Serial.println(fileName);
  }
}

void setup() {
  initSerial();
```

```
initSD();
dht1.begin();
dht2.begin();
displayHeaderSerial();
displayHeaderSD();
}

void loop() {
  tic = millis();
  float h1 = dht1.readHumidity();
  float t1 = dht1.readTemperature();
  float h2 = dht2.readHumidity();
  float t2 = dht2.readTemperature();
  myRTC.updateTime();

  displayDateTimeSerial();
  writeDataSerial(h1, t1, h2, t2, dt);
  displayDateTimeSD();
  writeDataSD(h1, t1, h2, t2, dt);
  dt = millis() - tic;
  delay(sleepTime);
}
```

Annexe IV

Développement du dispositif de mesure des températures

Afin d'accomplir ce processus de calibration, où il est nécessaire de mesurer les températures, il y'a eu recours à des capteurs de mesures de températures et d'une carte d'acquisition de données que nous avons assemblées nous même.

Le système Arduino se compose d'une plateforme open-source d'électronique programmable, qui repose sur une carte à microcontrôleur de la famille AVR, accompagnée d'un logiciel complet en tant qu'environnement de développement intégré. Ce logiciel permet d'écrire, de compiler et de transférer facilement le code de programme vers la carte à microcontrôleur (Techno-Science.net, n.d.).

La carte microcontrôleur du système Arduino (Figure 101) peut être connectée à des entrées et des sorties telles que des capteurs, des actionneurs, des afficheurs, des réseaux sans fil, etc. Le logiciel Arduino fournit un environnement de développement intégré (IDE) simple pour écrire et télécharger le code sur la carte. Il prend en charge de nombreux types de capteurs, de displays et d'autres périphériques externes à l'aide de ses entrées/sorties numériques et analogiques.

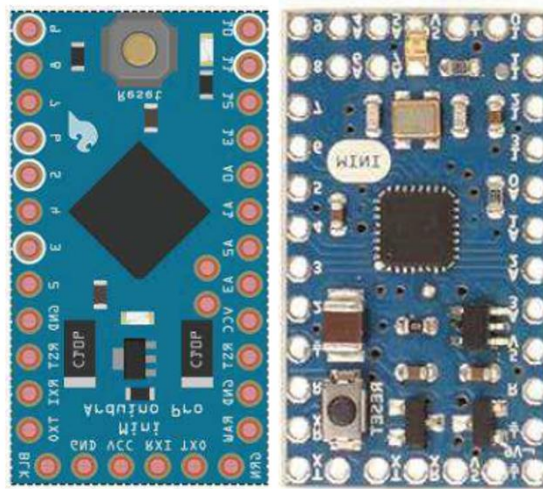


Figure 101: La carte microcontrôleur programmable « Arduino Pro mini »

Pour la construction du système de mesure la carte Arduino nécessite l'ajout de différents capteurs et éléments pour mesurer et stocker les informations requises.

1. Capteur de température et d'humidité « DHT22 »

Le DHT22 est un dispositif de mesure de température ambiante et d'humidité relative avec une haute précision (Figure 102). Il peut mesurer la température et l'humidité relative toutes les 2 secondes environ (Batier, 2016).

Le DHT22 utilise un protocole de communication numérique pour transmettre les données à un microcontrôleur, ce qui facilite la lecture des données et minimise les erreurs de transmission.

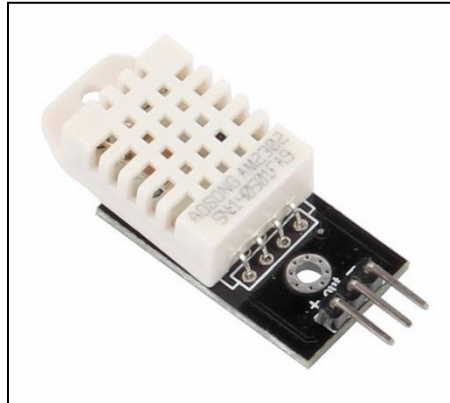


Figure 102: Capteur de température et d'humidité « DHT22 »

- Gamme de mesure de l'humidité relative : 0 à 100%
- Précision de mesure de l'humidité relative : $\pm 2\%$
- Gamme de mesure de la température : -40°C à 80°C
- Précision de mesure de la température : $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$
- Tension de fonctionnement : 3 à 5V
- Courant nominal : 2.5 mA
- Temps entre deux mesures : 2s
- Fréquence de transmission : 2 Hz
- Dimensions : 25 x 15 x 9 mm

2. Horodatage

Pour assurer une continuité et une synchronisation des données de l'heure et la date, une composante électronique est ajoutée au système appelé " Horloge en Temps Réel" (RTC en anglais "Real-Time Clock").

Les horloges en temps réel (Figure 103) sont habituellement alimentées par une petite batterie qui les maintient en fonctionnement, ce qui permet de conserver l'heure et la date même après une coupure de courant ou un redémarrage.

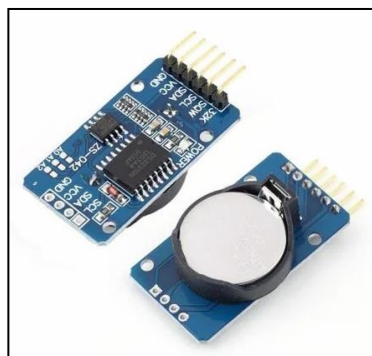
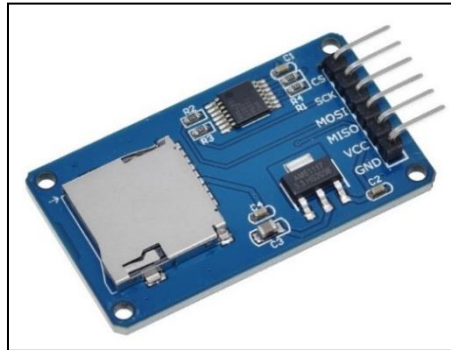


Figure 103: Module de l'horloge temps réel (RTC)

3. *Module lecteur de carte mémoire SD*

Un module lecteur de carte mémoire SD (Figure 104) est une composante électronique qui donne la capacité au système Arduino de lire et d'écrire des informations sur une carte mémoire SD (Secure Digital). La carte mémoire SD est un support de stockage utilisé pour conserver des données tels que des fichiers, des images, etc.

**Figure 104:** Module lecteur de carte mémoire SD