



**TECHNOLOGIES MOBILES ÉDUCATIVES POUR LA SENSIBILISATION ET
LA RÉDUCTION DE L'EMPREINTE CARBONE LIÉE AU DÉRÈGLEMENT
CLIMATIQUE**

Conception et évaluation de l'application ECO pour Android

par Esaie Guerson LARA

**Mémoire présenté à l'Université du Québec à Chicoutimi en vue de l'obtention du grade de
Maîtrise en informatique (M. Sc.).**

Québec, Canada

© Esaie Guerson LARA, 2025

RÉSUMÉ

Ce mémoire s'inscrit dans une démarche de recherche visant à explorer l'usage des technologies mobiles éducatives comme levier de sensibilisation à l'environnement. Face au dérèglement climatique et au manque d'engagement concret des citoyens, une solution mobile appelée **ECO** a été conçue pour évaluer l'empreinte carbone de chaque utilisateur et fournir un tableau de bord écologique personnalisé pour visualiser son impact et le guider vers des comportements plus durables à l'aide de recommandations personnalisées, intelligentes et adaptées.

L'adoption de notre approche méthodologique repose sur une combinaison rigoureuse de modèles comportementaux (tels que le modèle transthéorique et la théorie du comportement planifié), d'une analyse centrée sur l'utilisateur au moyen de l'élaboration de personas représentatifs et des technologies avancées comme la géolocalisation, l'intelligence artificielle, Firebase, Jetpack Compose et TensorFlow Lite.

L'application intègre des modules interactifs tels que la détection automatique du mode de transport, le suivi des habitudes, un système de notifications et des contenus éducatifs adaptés. Les résultats obtenus montrent que la solution adoptée est techniquement réalisable et potentiellement efficace pour initier un changement comportemental progressif. Elle constitue ainsi un outil important pour les politiques publiques de sensibilisation, l'éducation environnementale et la participation citoyenne face au dérèglement climatique.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	ii
TABLE DES MATIÈRES	iii
LISTE DES TABLEAUX	vii
LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES SIGLES	ix
DÉDICACE	xi
REMERCIEMENTS	xii
AVANT-PROPOS	xiii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1	3
1.1 CONTEXTE DU SUJET	3
1.2 PROBLEMATIQUE	7
1.3 PRINCIPAUX DEFIS OBSERVES PAR LES GRANDES ENTREPRISES DANS CE DOMAINE.	9
1.3.1 PROBLEME STRUCTUREL LIE A LA SENSIBILISATION	9
1.3.2 PROBLEMES TECHNIQUES LIES AUX TECHNOLOGIES EDUCATIVES	10
1.3.3 OBSTACLES COMPORTEMENTAUX LIES A L'ADOPTION DE NOUVELLES HABITUDES	11
1.4 LES REPERCUSSIONS DE L'INACTION	12
1.5 OBJECTIFS	13
1.5.1 OBJECTIF GENERAL	13
1.5.2 OBJECTIFS SPECIFIQUES	13
1.6 HYPOTHESES DE RECHERCHE	14
1.7 ORGANISATION DU MEMOIRE	14
CHAPITRE 2	16
FONDEMENTS SCIENTIFIQUES ET THEORIQUES	16
2.1 DEFINITION DES CONCEPTS CLES	16
2.2 MODELES THEORIQUES SUR LESQUELLES SE BASE NOTRE APPLICATION.	19
CHAPITRE 3	24
ETAT DE L'ART	24
3.1 UTILISATION DES APPLICATIONS POUR INFLUENCER LES COMPORTEMENTS ..	24
3.2 MÉTHODOLOGIE DE SÉLECTION DES APPLICATIONS	24
3.2.1 CONCEPTION METHODOLOGIQUE	25

3.2.2 SOURCES ET STRATEGIE DE RECHERCHE	25
3.2.3 CRITERES D'ELIGIBILITE	26
3.2.4 GRILLE D'EVALUATION (QUALITE, IMPACT, TRANSPARENCE).....	27
3.3 APPLICATIONS MOBILES LIEES AU DEREGLEMENT CLIMATIQUE.....	28
3.4 EVALUATIONS DES LIMITES DES OUTILS DE SENSIBILISATION EXISTANTS.....	30
3.5 SYNTHESE DES LIMITES OBSERVEES ET JUSTIFICATION D'UNE SOLUTION INNOVANTE.....	32
3.6 TABLEAU COMPARATIF DES APPLICATIONS EXISTANTES ET DE LA SOLUTION PROPOSEE.	34
3.7 ÉLÉMENTS CLES IDENTIFIES POUR GARANTIR LA VIABILITE D'UNE SOLUTION EDUCATIVE MOBILE.....	35
CHAPITRE 4	37
CONCEPTION DE LA SOLUTION MOBILE CENTREE UTILISATEUR.....	37
4.1 ANALYSE DES UTILISATEURS CIBLES : PERSONAS	37
4.1.1 METHODOLOGIE EMPLOYEE POUR ARRIVER A IDENTIFIER CHAQUE PERSONAS.	37
4.1.2 PRESENTATIONS DES PERSONAS CIBLES.	39
4.2 ÉVALUATION ÉCOLOGIQUE PERSONNALISEE ET PROFILS COMPORTEMENTAUX.	41
4.2.1 METHODE D'ÉVALUATION DE L'EMPREINTE CARBONE INDIVIDUELLE.	42
4.3 APPROCHE PERSONNALISÉE DE LA SITUATION ÉCOLOGIQUE POUR L'ÉVALUATION.....	43
4.3.1 CARACTERISTIQUE DE LA PERSONNE.....	43
4.3.2 PARTICIPATION ACTIVE DES INDIVIDUS.....	44
4.4 CRITÈRES POUR L'ÉVALUATION.....	44
4.5 CRÉATION D'UN PROFIL ÉCOLOGIQUE PERSONNALISÉ ET LES STRATEGIES DE MICRO ET MACRO-PERSUASION.	45
4.5.1 LES CURIEUX ÉCOLOGIQUES.	45
4.5.2 LES PARENTS RESPONSABLES.....	46
4.5.3 L'ENSEIGNANT OU EDUCATEUR ENGAGER.....	47

4.5.4 MILITANT ECOLOGIQUE.....	48
4.6 DEFINITION DES EXIGENCES FONCTIONNELLES ET NON FONCTIONNELLES....	49
4.6.1 EXIGENCES FONCTIONNELLES.	49
4.6.2 EXIGENCES NON-FONCTIONNELLES.....	51
4.7CHOIX TECHNOLOGIQUES ET JUSTIFICATION.....	52
CHAPITRE 5	55
IMPLEMENTATION ET VALIDATION DE LA SOLUTION.....	55
5.1 POLITIQUES OPERATIONNELLES DU SYSTEME.....	55
5.2 TABLEAU DE BORD POUR VISUALISER LES CRITERES ET IDENTIFIER LES POINTS A AMELIORER.	56
5.3 STRUCTURE DU TABLEAU DE BORD.....	57
5.4 ARCHITECTURE LOGICIELLE	58
5.5 DIAGRAMME ET MODELES (UML, CAS D’UTILISATION).....	59
5.5.1 CAS D’UTILISATION :	59
5.5.2 DIAGRAMME DE CAS D’UTILISATION(GRAPHIQUE).....	60
5.5.3 CLASSES PRINCIPALES :	60
5.5.4 UNIFIED MODELING LANGUAGE (UML)	62
5.6 INTERFACE DE L’APPLICATION.....	64
5.7 INSTRUMENTATION ET COLLECTE DES DONNÉES.....	67
5.8 PLAN DE VALIDATION TECHNIQUE.....	67
5.9 METHODOLOGIE D’EVALUATION DES IMPACTS.....	69
5.9.1 INDICATEURS OPÉRATIONNELS	69
CHAPITRE 6	72
SOMMAIRE DES IMPACTS.....	72
6.1 IMPACTS OPERATIONNELS.....	72
6.2 IMPACTS ORGANISATIONNELS	72
6.3 IMPACTS DURANT LE DEVELOPPEMENT	73
6.4 SOMMAIRE DES AMELIORATIONS	74
6.5 INCONVENIENTS ET LIMITES	75
6.5.1 LIMITES EN MATIERE DE COLLECTE DE DONNEES PRECISES.....	75

6.5.2 DEPENDANCE A LA TECHNOLOGIE DE GEOLOCALISATION....	75
6.5.3 ADOPTION ET RETENTION DES UTILISATEURS.	75
6.6 LA FAISABILITE ET LES RISQUES TECHNOLOGIQUES.	76
6.6.1 COMPLEXITE TECHNOLOGIQUE	76
6.6.2 RISQUES DE SECURITE ET DE CONFIDENTIALITE.....	76
6.7 MÉTHODOLOGIE D'ÉVALUATION DES IMPACTS.	76
CONCLUSION	80
LISTE DE RÉFÉRENCES	83

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : TABLEAU COMPARATIF DES APPLICATIONS EXISTANTES ET DE LA SOLUTION PROPOSEE.	34
TABLEAU 2 :LE TABLEAU DE CAS D'UTILISATION REPRESENTE CE QUE LE SYSTEME PROPOSE AUX UTILISATEURS.....	59

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : REPARTITION DES EMISSIONS DE CO ₂ PARMI LES 30 PRINCIPAUX PAYS EMETTEURS (DONNEES LES PLUS RECENTES)	7
FIGURE 2 : THEORIE DU COMPORTEMENT PLANIFIE SELON AJZEN (1991) (AJZEN, 1991).....	20
FIGURE 3 : STADES ET MODES D'ACCOMPAGNEMENT DU MODELE DE CHANGEMENT DE PROCHASKA ET DI CLEMENTE (CLEMENTE, 2009)	21
FIGURE 5 : INTERFACE DE L'APPLICATION KLIMA- ECRAN DE CALCUL DE L'EMPREINTE CARBONE	29
FIGURE 6 : INTERFACE DE L'APPLICATION WWF FOOTPRINT CALCULATOR- ECRAN DE CALCUL DE L'EMPREINTE CARBONE	30
FIGURE 7 : COMMENTAIRE DE LEANDRE MÄRKISCH (MÄRKISCH, S.D.)	31
FIGURE 8 : COMMENTAIRE DE CLAUDIO CODISPOTI (CODISPOTI, S.D.)	31
FIGURE 9 : DIAGRAMME DE CAS D'UTILISATION	60
FIGURE 10 : LE DIAGRAMME DE CLASSE CI-DESSUS ILLUSTRE L'ARCHITECTURE FONDAMENTALE DE L'APPLICATION, EN METTANT EN EVIDENCE LES ENTITES CLES AINSI QUE LEURS INTERACTIONS ET DEPENDANCES.....	63
FIGURE 11 : LES DIAGRAMMES DE SEQUENCES PERMETTENT DE DECRIRE COMMENT LES ELEMENTS DU SYSTEME INTERAGISSENT ENTRE EUX ET AVEC LES ACTEURS	64
FIGURE 12 : CAPTURE D'ECRAN DE L'APPLICATION.....	65
FIGURE 13 : CAPTURE D'ECRAN DE L'ACCUEIL DE L'APPLICATION	65
FIGURE 14 : CAPTURE D'ECRAN DE L'ANALYSE DE TRANSPORT DE L'APPLICATION.	66
FIGURE 15 : CAPTURE D'ECRAN DES RECOMMANDATIONS DE L'APPLICATION.	66

LISTE DES SIGLES

ADEME	Agence de la transition écologique (France)
API	Interface de programmation d'applications
BCT	Behavior Change Techniques (techniques de changement de comportement)
COP	Conférence des Parties
ECCC	Environnement et Changement climatique Canada
ECO	Application mobile éducative développée dans ce mémoire
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GPS	Global Positioning System
IA	Intelligence artificielle
IDDRI	Institut du développement durable et des relations internationales
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate
MVVM	Change (équivalent anglophone du GIEC) Model-View-ViewModel (architecture logicielle)
PNUE	Programme des Nations Unies pour l'Environnement
PRISMA	Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses
RATP	Régie autonome des transports parisiens
SI	Système international d'unités

TFLite	TensorFlow Lite (version allégée pour appareils mobiles)
TIC	Technologies de l'information et de la communication
TTW	Tank-to-Wheel (du réservoir à la roue ; périmètre « échappement »)
UI	User Interface (interface utilisateur)
UML	Unified Modeling Language
UNEP	United Nations Environment Programme (équivalent anglophone du PNUE)
UNESCO	Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture
UQAC	Université du Québec à Chicoutimi
UX	Expérience utilisateur
VE	Véhicule électrique
Wi-Fi	Norme de réseau local sans fil (IEEE 802.11)
WWF	World Wide Fund for Nature

DÉDICACE

À ma famille, pour son amour, sa patience et son indéfectible soutien.

À mes parents, qui m'ont appris la valeur de l'effort et de la persévérance.

À mon directeur de mémoire, M. Bob-Antoine Jerry Ménélas, pour son exigence
bienveillante et l'inspiration qu'il m'a apportée.

À toutes celles et ceux qui croient que la science et l'éducation peuvent changer le monde.

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de mémoire, M. Bob-Antoine Jerry Ménélas, pour son accompagnement scientifique, sa disponibilité, ses conseils méthodologiques et la confiance qu'il m'a accordée.

Je remercie également les membres du jury pour le temps consacré à l'évaluation de ce travail ainsi que pour la qualité de leurs commentaires, de même que l'équipe enseignante et administrative, dont le soutien m'a été précieux tout au long de ce projet.

Enfin, mes remerciements vont à mes collègues pour leurs échanges stimulants, ainsi qu'à ma famille pour son soutien moral indéfectible.

AVANT-PROPOS

Ce travail est né d'un double constat : l'urgence climatique, désormais largement documentée, et la nécessité de relier la prise de conscience des citoyennes et des citoyens à des gestes concrets, simples et mesurables. Les technologies mobiles offrent une opportunité privilégiée pour accompagner cette transition en rapprochant l'information, le suivi et la rétroaction de l'utilisateur au quotidien.

L'objectif de ce mémoire est de concevoir et d'évaluer une application mobile éducative (ECO) visant à estimer l'empreinte carbone des déplacements et à soutenir l'adoption de pratiques plus durables via des contenus pédagogiques et des recommandations personnalisées. Le périmètre retenu se concentre sur le domaine de la mobilité et exploite les capteurs des téléphones Android (accéléromètre, gyroscope, GPS, Wi-Fi/cellulaire) pour détecter les modes de transport et calculer des indicateurs d'émissions. Le travail présente l'architecture logicielle, le tableau de bord, la chaîne de calcul capteurs, indicateurs et la méthodologie d'évaluation des impacts.

Ce projet comporte néanmoins des limites assumées : qualité hétérogène des données capteurs et dépendance à l'activation de la géolocalisation, ainsi que le recours ponctuel à des données autodéclarées. Ces choix méthodologiques peuvent limiter la généralisation des résultats, mais ils fournissent un cadre reproductible et transparent pour des validations ultérieures à plus grande échelle.

INTRODUCTION

Le dérèglement climatique représente une modification durable du climat de la planète. Selon l'article « Contributions nationales au changement climatique dues aux émissions », l'augmentation des émissions anthropiques de dioxyde de carbone (CO₂), de méthane (CH₄) constitue des composants clés responsables du changement climatique depuis la période préindustrielle. L'utilisation de sources de carbone fossiles dans les secteurs de l'énergie, de l'industrie, des transports, des déchets et de l'utilisation des produits, ainsi que dans l'exploitation et le changement d'affectation des terres, ainsi que dans la foresterie, a entraîné une augmentation des concentrations atmosphériques de CO₂ et de CH₄, ce qui entraîne un excédent du bilan énergétique à la surface de la Terre (Matthew, Glen, Thomas, Robbie, & Clemens, 2023).

Au cours des cent (100) dernières années, la température moyenne sur la Terre a augmenté de 0,74°C (depuis la révolution industrielle) et l'hémisphère nord est désormais considérablement plus chaud qu'à n'importe quelle période au cours du dernier millénaire. Par ailleurs, l'activité humaine a fait croître énormément la concentration de certains gaz à effet de serre (GES), tels que le dioxyde de carbone (CO₂), en libérant du carbone additionnel qui était auparavant stocké dans le sol sous forme de charbon et de pétrole brut (Chen & Liu, 2014).

Face à ces constats, il devient essentiel de comprendre non seulement les causes et les manifestations du dérèglement climatique, mais aussi le cadre global dans lequel il s'inscrit. C'est dans cette perspective que la section suivante présente le contexte général, en mettant en lumière l'ampleur du phénomène, ses impacts différenciés à travers le monde, ainsi que les principales initiatives mises en place pour y faire face.

CHAPITRE 1

1.1 CONTEXTE DU SUJET

Aujourd'hui, nous sommes confrontés au dérèglement climatique qui constitue l'un des défis majeurs de notre époque, dont la gravité s'intensifie chaque jour, rendant plus urgente la nécessité d'agir. Ce phénomène climatique est le problème déterminant du **XXI^e** siècle au sens large et inclut également les changements à long terme des conditions météorologiques. Des observations récentes montrent qu'un réchauffement supérieur à la moyenne mondiale a été constaté dans de nombreuses régions et saisons. La plupart des zones continentales subissent un réchauffement plus intense que la moyenne globale, tandis que les régions océaniques évoluent à un rythme plus lent. Selon les données de température disponibles, entre 20 % et 40 % de la population mondiale vivait, entre 2006 et 2015, dans des régions ayant déjà connu un réchauffement supérieur à 1,5 °C par rapport à la période préindustrielle, et ce, pendant au moins une saison. En raison de la longue durée de vie du CO₂, les températures continueront d'augmenter pendant de nombreuses années (IPCC, 2018) ((OMM), 2023).

Les recherches scientifiques montrent que les émissions de gaz à effet de serre dues aux activités humaines ont augmenté. En 2023, la température moyenne annuelle mondiale a augmenté de 1,2 °C et le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) prévoit une augmentation possible jusqu'à 5 °C à l'horizon 2100, ce qui constituerait un scénario catastrophique pour la planète et ses habitants. Selon le GIEC, pour limiter le réchauffement à 1,5 °C, nous devons diminuer les émissions dès aujourd'hui et les réduire de près de 43 % d'ici à 2030. (Claire, Gilbert, Valérie, Lecat, & Sophie, 2024).

Toutefois, il est important de mentionner que la responsabilité face au réchauffement climatique est inégalement répartie à travers le monde. Selon l'article de Hannah Ritchie et Max Roser sur le site web ourworldindata.org, dans la section « Quelle quantité de CO₂ le monde émet-il ? Et quels pays en émettent le plus ? », il est indiqué que de nombreux pays présentent encore de très faibles émissions de CO₂ par habitant. Dans nombre des pays les plus pauvres d'Afrique subsaharienne, comme le Tchad, le Niger et la République centrafricaine, l'empreinte carbone moyenne est d'environ 0,1 tonne par an. Cela représente environ 150 fois moins qu'aux États-Unis, en Australie et au Canada. Un Américain ou un Australien moyen génère en moins de deux jours la même quantité d'émissions qu'un Malien ou un Nigérien moyen en une année entière. (Hannah & Max, 2024)

Dans ce contexte, plusieurs initiatives internationales majeures ont vu le jour. L'Accord de Paris fixe des objectifs globaux de réduction des émissions. Les conférences des parties (COP) assurent le suivi et la négociation de nouveaux engagements. Le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE), de son côté, appuie ces efforts pour utiliser les technologies numériques afin d'obtenir des résultats inclusifs, transparents et innovants. Ces outils, notamment les applications mobiles, deviennent ainsi des leviers essentiels pour soutenir l'action climatique mondiale.

Toutefois, malgré la mise en place de ces initiatives internationales, le déficit d'éducation sur le changement climatique reste un obstacle majeur à la mobilisation citoyenne. Selon l'UNESCO (2023), l'éducation au climat est un levier essentiel pour renforcer la compréhension des enjeux environnementaux, développer des compétences d'adaptation et encourager les comportements durables. Des programmes tels que des partenariats, l'éducation verte ou le programme **Climate Action**, ont été déployés dans

plusieurs pays afin d'intégrer les questions climatiques dans les programmes scolaires et universitaires. (Alison, 2024)

Cependant, ces efforts présentent plusieurs limites,

1. **Disparités régionales :** Dans de nombreux pays à revenu faible ou intermédiaire, l'enseignement relatif au climat est partiel, souvent limité à des notions générales et il est rarement adapté au contexte local. (Carlie, Stephanie, & Jessica, 2023)
2. **Manque de formation des enseignants :** De nombreuses recherches montrent que beaucoup d'enseignants ne disposent pas de ressources pédagogiques actualisées ni d'une formation scientifique suffisante pour aborder efficacement le changement climatique en classe. Ce déficit se traduit par une couverture limitée du sujet, souvent cantonnée à quelques notions générales, et par un manque de confiance des éducateurs pour intégrer des contenus climatiques contextualisés et scientifiquement rigoureux. (Veronika, Johanna, & Andrea, 2022)
3. **Résistance culturelle et idéologique :** Dans certaines régions, notamment aux États-Unis et en Australie, une partie de la population continue de remettre en question la réalité ou l'ampleur du changement climatique, ce qui freine l'intégration de ces notions dans l'éducation formelle. (Matthew, Emily, Paul, & Kelly, 2016)
4. **Fracture numérique et accès limité à l'information :** Dans de nombreuses régions rurales ou défavorisées, l'accès à des contenus éducatifs fiables et compréhensibles reste limité. Cette fracture numérique, accentuée par un usage restreint des technologies de l'information et de la communication, réduit les opportunités d'apprentissage et freine la diffusion des connaissances, y compris en matière de changement climatique. (Alexander & Jan, 2013)

Cette combinaison de facteurs explique pourquoi, malgré la multiplication des initiatives institutionnelles, une partie importante de la population mondiale demeure insuffisamment sensibilisée aux enjeux climatiques. Or, une éducation climatique complète, contextualisée est indispensable pour transformer la prise de conscience en actions concrètes.

Le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) adopte une approche en quatre volets pour faire face à la crise climatique et réduire les émissions de gaz à effet de serre conformément à l'Accord de Paris. L'organisation ;

Recherche scientifique : Le Programme des Nations Unies pour l'Environnement PNUE fournit des recherches de pointe pour soutenir la prise de décision scientifique sur le dérèglement climatique.

Transition vers un avenir à faibles émissions : L'organisation travaille dans tous les secteurs pour soutenir la transition vers un avenir à faibles émissions de carbone et résilient face au dérèglement climatique.

Adaptation climatique équitable : Le PNUE assure une transition juste vers un monde neutre en carbone en permettant aux communautés de s'adapter aux conditions climatiques changeantes.

Financements climatiques : Le PNUE développe des mécanismes durables pour débloquer des financements afin d'aider les pays à atténuer le dérèglement climatique et à s'y adapter.

Pourtant, malgré ces efforts globaux, il persiste un écart important entre les grandes orientations politiques et l'implication concrète des citoyens. Il manque encore des outils pratiques, personnalisés et accessibles qui permettraient à chacun de mieux comprendre son impact et de passer à l'action au quotidien. Ce constat pose ainsi les bases de la problématique de ce mémoire.

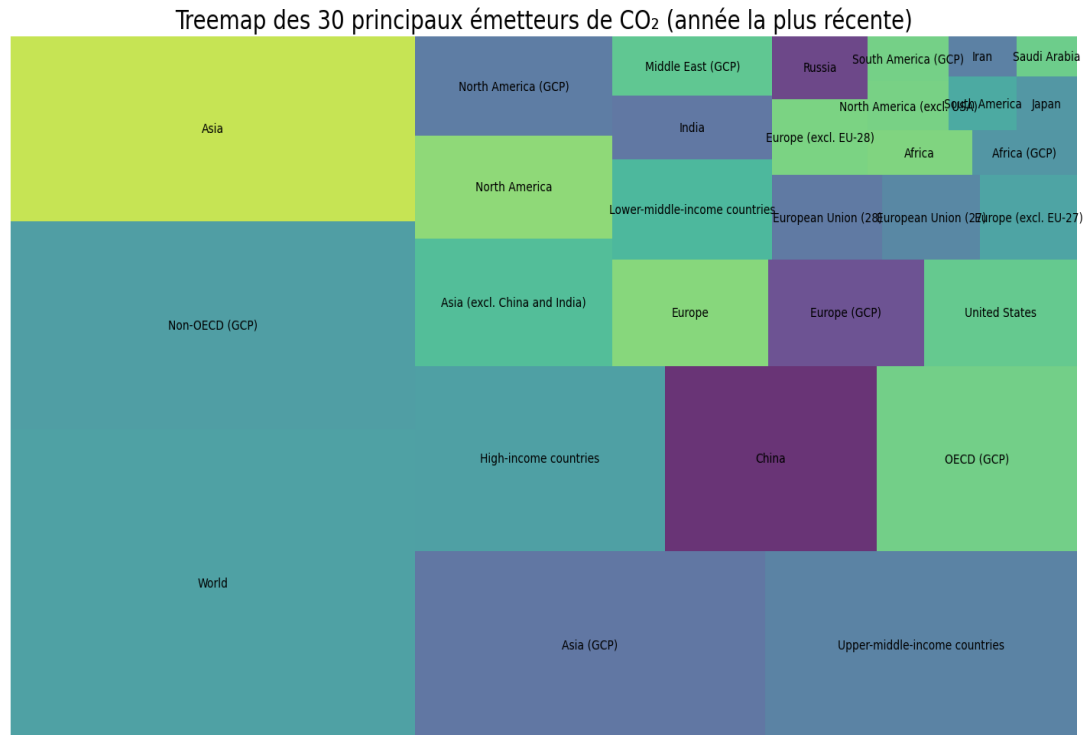


Figure 1 Répartition des émissions de CO₂ parmi les 30 principaux pays émetteurs (données les plus récentes)

Source: Adaptée de *Our World in Data*, base de données CO₂, 2024 (Hannah & Max, 2024).

1.2 PROBLEMATIQUE.

En dépit de nombreuses initiatives internationales et des engagements pris dans le cadre de l'Accord de Paris, les changements climatiques sont la question déterminante de notre époque et nous sommes à un moment décisif. De l'évolution des conditions qui ont des effets sur la production agricole et alimentaire, à l'élévation du niveau des mers, qui augmente les risques d'inondations, les conséquences des changements climatiques sont mondiales en

termes d'effets et d'échelle. Sans action immédiate, il sera beaucoup plus difficile et coûteux de s'adapter aux conséquences futures de ces changements (Unies, 2015).

Dans ce cadre, le développement d'outils numériques, et notamment d'applications mobiles éducatives, est perçu comme une opportunité innovante pour rapprocher les utilisateurs de leur impact écologique personnel. L'ONU travaille sur un agenda international pour le développement durable depuis 2016 et a souligné la technologie comme un moteur irremplaçable pour atteindre des objectifs durables spécifiques d'ici 2030 (Oriana, Andrea, Sara, Giuliano, & Ferdinando, 2024). La numérisation révolutionne nos interactions avec l'environnement, de la surveillance des écosystèmes à la préservation des ressources, en passant par l'influence sur les marchés et les comportements de consommation. Selon Florian Bemmman et Carmen Mayer en exploitant le numérique de manière responsable, nous pouvons relever plusieurs défis environnementaux, atténuer les effets du dérèglement climatique, nous y adapter et garantir le bien-être de notre planète et des générations futures. En définitive, nous ne pourrions pas atteindre la rapidité et l'ampleur des changements de comportement nécessaires à la durabilité mondiale sans exploiter les technologies et les opportunités numériques (Florian, Carmen, & Sven, 2023).

Ainsi, face à l'urgence climatique et à la nécessité d'impliquer davantage les citoyens dans la transition écologique, il devient impératif de concevoir des solutions numériques concrètes, en particulier les applications mobiles, qui apparaissent comme des outils clés, conçues pour être accessibles, interactives et personnalisées, les applications mobile offrent un potentiel important pour favoriser la prise de conscience, informer de manière claire, et encourager une évolution progressive des comportements. C'est dans cette perspective que s'inscrit la présente mémoire, en explorant comment une application mobile éducative peut accompagner les utilisateurs vers des pratiques plus durables face au dérèglement climatique.

1.3 PRINCIPAUX DEFIS OBSERVES PAR LES GRANDES ENTREPRISES DANS CE DOMAINE.

Au-delà des constats globaux sur le dérèglement climatique, plusieurs grandes entreprises et organisations internationales mettent en évidence les défis persistants qui freinent l'adoption de comportements durables et limitent l'efficacité des actions de sensibilisation. Ces défis se manifestent à différents niveaux, qu'ils soient structurels, techniques ou comportementaux. La section suivante présente ces défis afin de mieux cerner les obstacles actuels et d'orienter la conception de solutions adaptées.

1.3.1 PROBLEME STRUCTUREL LIE A LA SENSIBILISATION.

Manque d'éducation sur le réchauffement climatique.

Consciente du fait que l'éducation est essentielle pour permettre aux individus et aux communautés de comprendre et d'affronter les difficultés entraînées par le changement climatique, l'UNESCO, en sa qualité de secrétariat du Partenariat pour une éducation verte, promeut l'éducation au changement climatique comme outil fondamental pour sensibiliser les générations futures, les encourager à changer de comportement et leur donner les compétences nécessaires pour mettre au point des solutions durables (UNESCO, 2024).

Difficulté d'accès aux informations pratiques.

Bien que la technologie de l'information et de la communication soit souvent présentée comme une solution idéale pour améliorer la mobilité et réduire les émissions de gaz à effet de serre, selon Florence Miroux (RATP, IDDRI) et Benoit Lefèvre (IDDRI) dans leur article (Mobilité urbaine et

technologies de l'information et de la communication (TIC) : enjeux et perspectives pour le climat) révèle une réalité plus complexe. L'accès aux informations pratiques reste limité pour une partie des citoyens. Les plateformes numériques, parfois trop techniques ou dispersées, créent des barrières pour les usagers peu familiarisés avec ces outils. Ainsi, au lieu de faciliter la transition écologique, ces technologies peuvent renforcer les inégalités d'accès à l'information. Cela montre que sans une véritable prise en compte des usagers réels et des besoins des populations, les technologies de l'information et de la communication risquent de devenir un frein plutôt qu'un levier à l'adoption des comportements durables. (Florence & Benoît, 2012)

1.3.2 PROBLEMES TECHNIQUES LIES AUX TECHNOLOGIES EDUCATIVES.

Manque d'outils pour l'éducation environnementale.

Si la sensibilisation aux enjeux environnementaux est bien ancrée dans plusieurs écoles, le défi reste de taille lorsqu'il s'agit de transformer cette prise de conscience en actions concrètes. Le programme Carbone **Scol'ERE** en France vise à impliquer les élèves en les intégrant à des défis collectifs liés aux enjeux environnementaux. En 2025, ce dispositif sera enrichi avec de nouveaux outils pédagogiques, incluant des fiches-ressources pour approfondir les notions travaillées. (Ghislain, Geneviève, Benoit, Charles-Hugo, & Audrey, 2022)

Peu d'intégration de la technologie « mobile » dans l'éducation.

Les technologies de l'information et de la communication (TIC) sont une combinaison de technologies de télécommunication pour l'acquisition, le stockage, la manipulation et la diffusion d'informations. La communication en temps opportun des changements climatiques aux individus est freinée à la fois par le manque d'accès à des informations fiables et précises et par la difficulté à évaluer, analyser et assimiler les données issues de sources multiples. L'utilisation des TIC peut réduire les risques liés au changement climatique en améliorant la productivité de la communication et en sensibilisant le grand public aux risques associés au changement climatique (Almustapha, Lawan, & Maryam, 2020)

1.3.3 OBSTACLES COMPORTEMENTAUX LIES A L'ADOPTION DE NOUVELLES HABITUDES.

Résistance au changement.

De nombreuses personnes sont réticentes à modifier leurs habitudes, souvent par attachement à leurs routines ou par peur de perdre du confort. La résistance au changement est un incontournable dans l'étude des réactions humaines au changement. Lorsqu'on aborde la question de l'employé visé par le changement, il est presque toujours question de la résistance au changement. (Céline, 2004)

Engagement à long terme insuffisant.

Maintenir des comportements durables sur le long terme peut être difficile sans un soutien continu et des motivations claires (Dominika, Stephan, Martin, & Falko, 2016).

1.4 LES REPERCUSSIONS DE L'INACTION.

L'inaction face au réchauffement climatique entraînerait des conséquences irréversibles et de grande ampleur, affectant l'ensemble des systèmes naturels et humains. Les effets du dérèglement climatique touchent plusieurs domaines clés, rendant ce phénomène d'autant plus urgent à résoudre. Le problème est important pour plusieurs raisons :

Répercussions environnementales

Les changements climatiques entraînent des phénomènes météorologiques extrêmes, tels que des tempêtes plus violentes, des sécheresses et des inondations. Ces événements détruisent des habitats naturels, menacent la biodiversité et perturbent les écosystèmes. (Melese, 2021)

Répercussions sociales

Les populations les plus vulnérables comme les enfants, sont souvent les plus touchées par les effets du réchauffement climatique. Elles subissent les conséquences des catastrophes climatiques, entraînant des migrations forcées, des conflits, des problèmes de santé publique causés par la pollution et les conditions de vie extrêmes. (Patricia, Kathryn, & Celia, 2018)

Répercussions économiques

Les secteurs économiques comme l'agriculture, la pêche et le tourisme peuvent être gravement affectés par le dérèglement climatique, entraînant des pertes de revenus et des emplois qui affectent directement les moyens de subsistance (Richard, 2018).

Répercussions sur la santé publique.

L'augmentation des températures favorise la propagation des maladies, crée des vagues de chaleur et accroît la pollution de l'air, rendant les conditions de vie difficiles et augmentant les risques pour la santé publique (Nick, Markus, Nigel, Sonja, & Krisztina, 2018).

1.5 OBJECTIFS.

1.5.1 OBJECTIF GENERAL.

Ce projet vise à développer une application mobile éducative permettant aux utilisateurs d'évaluer leur empreinte carbone et d'accéder à des informations personnalisées visant à faciliter la compréhension de l'impact environnemental, sans supposer à un changement immédiat de comportement, tout en s'inscrivant dans les objectifs de développement durable, notamment la lutte contre le dérèglement climatique définis par les Nations Unies.

1.5.2 OBJECTIFS SPECIFIQUES.

- **Identifier** les principales sources d'émissions de gaz à effet de serre liées aux déplacements individuels.
- **Sensibiliser** la population à l'impact de ses actions sur l'environnement, en fournissant des informations claires et accessibles sur le réchauffement climatique et en illustrant de manière interactive les conséquences des comportements individuels.

- **Encourager** des comportements plus durables en proposant des recommandations personnalisées pour réduire l’empreinte carbone et en mettant en place un système de suivi.
- **Contribuer** à la réduction des émissions de gaz à effet de serre en fixant des objectifs chiffrés de réduction de l’empreinte carbone pour les utilisateurs, en mesurant et en communiquant l’impact collectif des actions des utilisateurs.

1.6 HYPOTHESES DE RECHERCHE.

L’utilisation d’une application mobile permettant d’évaluer l’empreinte carbone des utilisateurs pourrait progressivement encourager une prise de conscience individuelle et constituer un point de départ vers une éventuelle évolution des comportements face au dérèglement climatique.

1.7 ORGANISATION DU MEMOIRE.

Le reste du document est subdivisé en plusieurs chapitres afin d’explorer progressivement les différentes parties du mémoire.

Chapitre 2 : Cadre théorique

Ce chapitre définit les principaux concepts utilisés dans cette recherche. Il s’appuie sur des modèles comportementaux (la théorie du comportement planifié et le modèle transthéorique) pour guider la conception de l’application mobile.

Chapitre 3 : Etat de l’art

Ce chapitre analyse les travaux de recherche existants sur la sensibilisation au dérèglement climatique et l’usage des technologies numériques pour l’éducation environnementale. Il couvre également les concepts liés aux applications mobiles éducatives et aux modèles de changement de comportement.

Chapitre 4 : Personas, conception et méthodologie

Dans ce chapitre, nous présentons les personas et nous détaillons la conception de l'application mobile, les fonctionnalités proposées, les personas et les technologies utilisées. Nous décrivons également la méthodologie adoptée pour le développement et la validation de l'application.

Chapitre 5 : Implémentation et expérimentation

Ce chapitre présente le processus de développement de l'application, les défis rencontrés et les solutions adoptées. Il décrit ensuite les tests réalisés pour évaluer l'efficacité de l'application et les retours des utilisateurs.

Chapitre 6 : Analyse et discussion des résultats

Nous discutons de l'impact de l'application sur la sensibilisation des utilisateurs et de son efficacité pour encourager des comportements plus respectueux de l'environnement.

Chapitre 7 : Conclusion et perspectives

Nous présentons un sommaire des impacts du projet et de ses limites. Ce chapitre propose également des pistes d'amélioration et des perspectives dans le domaine de la sensibilisation environnementale par les technologies mobiles.

CHAPITRE 2

FONDEMENTS SCIENTIFIQUES ET THEORIQUES.

Ce chapitre expose les théories comportementales qui servent de base à la conception de l'application mobile développée dans ce mémoire. Cette application vise à sensibiliser les utilisateurs à la prise de conscience de leur empreinte carbone et à les accompagner vers une réduction progressive de leurs émissions, au moyen de recommandations personnalisées et des outils interactifs. Avant de présenter les modèles, il est important de définir certains concepts clés qui structurent le champ de réflexion du projet.

2.1 DEFINITION DES CONCEPTS CLES.

- **Dérèglement climatique :** Par « dérèglement climatique », nous entendons l'ensemble des altérations persistantes des états moyens, des variabilités et des extrêmes du système climatique terrestre (atmosphère, océans, cryosphère et biosphère) principalement causées par l'augmentation anthropique des gaz à effet de serre (GES). Ce dérèglement inclut, mais ne se limite pas, au réchauffement global de la température de surface ; il s'exprime aussi par l'intensification du cycle hydrologique (précipitations extrêmes et sécheresses plus fréquentes), l'augmentation de la fréquence et/ou de l'intensité de certains événements extrêmes (vagues de chaleur, pluies intenses, feux de forêt, inondations), la fonte généralisée des glaciers et de la banquise, l'élévation du niveau moyen des mers, ainsi que des modifications de la circulation atmosphérique et océanique ainsi que de la saisonnalité. Les océans se réchauffent, s'acidifient (baisse du pH en raison de l'absorption du CO₂) et se désoxygènent ; ces changements affectent les écosystèmes, les ressources en eau et en nourriture et, par cascade, la santé, l'économie et la sécurité humaine (IPCC I. P., 2021) ((IPCC), Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and

Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022).

À distinguer du « réchauffement climatique » :

Le « réchauffement climatique » désigne l'augmentation de la température moyenne de la surface terrestre due aux émissions de GES. Le « dérèglement climatique » est un concept plus large : il inclut ce réchauffement mais couvre aussi l'ensemble des perturbations du système climatique (hydrologie, océans, cryosphère, circulation, extrêmes) et leurs effets systémiques sur les sociétés et les écosystèmes. (IPCC I. P., 2021) ((IPCC), Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Summary for Policymakers, 2022).

Principaux marqueurs observés du dérèglement climatique

- ✓ **Réchauffement global** : $\approx 1,1$ °C sur 2011-2020 par rapport à 1850-1900 ; l'influence humaine est sans équivoque (IPCC I. P., 2021).
- ✓ **Extrêmes** : renforcement des vagues de chaleur, des précipitations intenses et des sécheresses agricoles/écologiques dans de nombreuses régions (Perkins-Kirkpatrick & Lewis, 2020).
- ✓ **Montée du niveau moyen des mers** : ~ 20 cm depuis 1901, avec une accélération au cours des dernières décennies (Nerem, et al., Climate-change–driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era, 2018).
- ✓ **Océans** : acidification (baisse mesurée du pH en surface), réchauffement et désoxygénation, avec des impacts sur les écosystèmes marins (Doney, Fabry, Feely, & Kleypas).

- ✓ **Cryosphère** : perte de masse généralisée des glaciers, diminution de l'étendue de la banquise arctique et dégel du pergélisol (Perkins-Kirkpatrick & Lewis, 2020) (Biskaborn, Smith, Noetzli, & al., 2019).
- ✓ **Perturbations régionales** : déplacements de la saisonnalité et des régimes météorologiques, modification des circulations atmosphériques et océaniques (IPCC I. P., 2021).

Implications pour ce mémoire

Dans la suite du travail, nous utiliserons « dérèglement climatique » au sens large décrit ci-dessus. Cette définition justifie que l'application ne se limite pas au suivi de la température ou de l'empreinte carbone, mais intègre des contenus pédagogiques relatifs aux extrêmes, à l'eau, aux océans et à la vulnérabilité des systèmes humains.

- **Empreinte carbone** : L'empreinte carbone est une mesure des émissions de gaz à effet de serre rejetées dans l'atmosphère par une personne, une organisation, un produit ou une activité. Une plus grande empreinte carbone signifie davantage d'émissions de dioxyde de carbone et de méthane, et donc une plus grande contribution à la crise climatique. Mesurer l'empreinte carbone d'une personne ou d'une organisation consiste à examiner des émissions directes résultant de la combustion de combustibles fossiles pour la production d'énergie, le chauffage et les déplacements terrestres et aériens, ainsi que des émissions indirectes résultant de la production et de l'élimination de tous les aliments, biens manufacturés et services qu'elle consomme (Flynn, 2023).
- **Sensibilisation environnementale** : Sensibilisation à l'environnement, c'est avant tout une prise de conscience. C'est ouvrir les yeux sur l'impact de nos actions sur la nature,

comprendre les enjeux du développement durable et réaliser que nous avons tous un rôle à jouer pour préserver notre environnement. C'est un appel à l'action, une invitation à changer nos comportements et les stratégies des entreprises afin de réduire notre impact sur l'environnement et assurer un avenir plus durable (C. & C., 2017).

- **Application mobile éducative :** De nouvelles recherches montrent que l'utilisation accrue des appareils mobiles dans l'éducation. Les appareils mobiles modernes permettent un travail interactif. Travailler sur une tablette est plus facile que sur PC. Il est donc nécessaire d'adapter les supports pédagogiques aux appareils mobiles. Ces éléments contribuent à améliorer le travail dans les écoles primaires et les classes de terminale. Par exemple, l'App Store pour iOS propose une multitude de logiciels éducatifs pour les enfants d'âge préscolaire et élémentaire (Fojtik, 2014).

2.2 MODELES THEORIQUES SUR LESQUELLES SE BASE NOTRE APPLICATION.

Dans cette section, nous présentons les concepts et théories qui soutiennent la conception de l'application ainsi que l'approche adoptée pour sensibiliser à la réduction de l'empreinte carbone.

2.2.1 MODELE DU COMPORTEMENT PLANIFIE (THEORY OF PLANNED BEHAVIOR- TPB)

La théorie du comportement planifié, proposée par Ajzen (1991) a émergé dans le champ de la psychologie sociale comme un moyen de prédire les comportements. Elle part du constat que les individus prennent des décisions raisonnées et que le comportement est le résultat de l'intention de s'y engager. Plus l'intention est forte,

plus la personne fera des efforts pour adopter ce comportement et plus il est probable qu'elle s'engage dans ce comportement (Ajzen, 1991). L'intention dépend de trois variables (en vert ci-dessous), comme l'illustre le diagramme suivant :

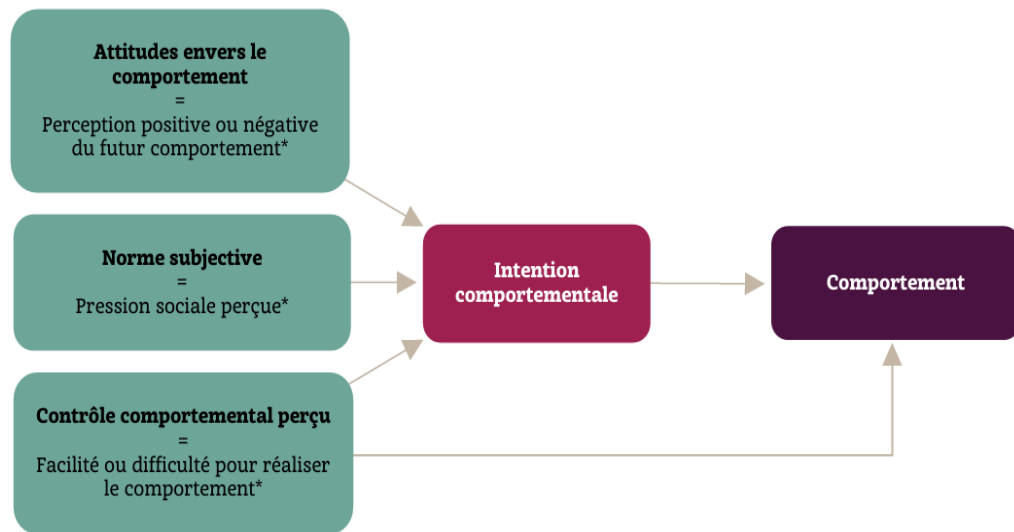


Figure 2 : théorie du comportement planifié selon Ajzen (1991) (Ajzen, 1991)

Lien avec le projet :

Dans le cadre de ce mémoire, l'application développée s'appuie directement sur la théorie du comportement planifié pour structurer son approche comportementale. Elle vise tout d'abord à influencer l'attitude des utilisateurs en leur fournissant des informations personnalisées et accessibles sur les impacts environnementaux de leurs actions. En parallèle, elle cherche à mobiliser les normes sociales en intégrant des mécanismes de classement, des défis écologiques et de l'engagement collectif, afin de créer un effet d'entraînement positif. Enfin, l'application renforce le sentiment de contrôle comportemental en proposant des actions concrètes, simples à réaliser et

adaptées au contexte de chaque utilisateur, ce qui facilite le passage de l'intention à l'action.

2.2.2 MODELE TRANSTHEORIQUE

Le modèle comprend six stades et huit modes d'accompagnement du changement.

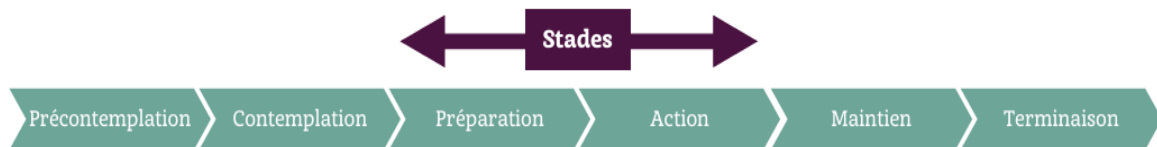


Figure 3 : Stades et modes d'accompagnement du modèle de changement de Prochaska et Di Clemente (Clemente, 2009)

- **Précontemplation** : Pendant ce stade, la personne n'envisage pas de changer de comportement.
- **Contemplation** : Ici, la personne est consciente qu'elle doit changer de comportement et a envie de le faire.
- **Préparation** : La personne a l'intention de changer et projette des actions à court terme. Peut-être a-t-elle déjà pris l'initiative d'effectuer des recherches, de demander des informations ou de penser à un plan d'action pour se préparer à modifier son comportement.
- **Action** : C'est le stade où la personne a déjà réalisé des actions concrètes. Elle évalue les avantages et inconvénients du nouveau comportement et essaie différentes alternatives de comportements plus favorables. Cette phase est la plus instable et il y a donc plus de risques de rechute à cause des possibles obstacles rencontrés.

- **Maintien** : Ce stade commence 6 mois après la réussite de l'objectif. La personne essaie de ne pas retourner au comportement antérieur, elle est moins tentée de rechuter et a plus de confiance en sa capacité à maintenir son changement, même s'il existe toujours le risque d'une rechute.
- **Terminaison** : C'est le moment où la personne a intégré le nouveau comportement à son quotidien. Il n'existe plus de risque de rechute même s'il y a des situations qui représentent des tentations (Clemente, 2009).

Lien avec le projet :

L'application mobile développée dans ce projet s'appuie sur le modèle transthéorique du changement pour structurer son approche pédagogique et comportementale. Elle accompagne les utilisateurs tout au long du processus de transformation en adaptant ses interventions aux différentes étapes identifiées dans le modèle. Dès la précontemplation, elle propose des contenus informatifs accessibles visant à éveiller la conscience environnementale. Lors de la contemplation, elle encourage la réflexion au moyen de recommandations contextualisées. En phase de préparation, l'application suggère des actions simples à entreprendre à court terme. Durant la phase d'action, elle offre un soutien actif par le biais de notifications, de rappels et de défis personnalisés. Ensuite, pour favoriser le maintien des bonnes pratiques, elle propose un suivi régulier à travers des tableaux de bord visuels et un historique des progrès. Enfin, elle vise l'intégration complète de ces comportements en les rendant naturels et automatiques dans le quotidien des utilisateurs.

Ainsi, l'application joue un rôle personnalisé, en alignement avec les principes du modèle transthéorique, pour soutenir un changement durable et progressif des habitudes liées à l'empreinte carbone.

CHAPITRE 3

ETAT DE L'ART

Ce chapitre présente un état de l'art des approches, des outils et des technologies existants dans le domaine de la sensibilisation au dérèglement climatique. L'objectif est d'identifier les tendances actuelles, les limites des solutions en place et de positionner le projet dans un cadre scientifique et technologique pertinent. Cette analyse critique servira de base pour justifier les choix de conception de la solution proposée dans ce mémoire.

3.1 UTILISATION DES APPLICATIONS POUR INFLUENCER LES COMPORTEMENTS

Les applications mobiles occupent une place de plus en plus centrale dans les stratégies de sensibilisation au dérèglement climatique. Elles offrent une plateforme essentielle permettant aux utilisateurs d'accéder à des informations éducatives, de mesurer leur impact écologique et de recevoir des recommandations personnalisées (Fojtík, 2014).

En combinant accessibilité, interactivité et outils de suivi, ces solutions numériques facilitent la prise de conscience environnementale (Stoyanov, et al., 2015). De plus, elles intègrent souvent des approches fondées sur les sciences comportementales afin d'encourager un changement progressif des habitudes (Ajzen I. , 1991). Cette capacité à accompagner les individus dans leur transition écologique fait des technologies mobiles un levier prometteur dans la lutte contre le dérèglement climatique ((UNEP), 2025).

3.2 MÉTHODOLOGIE DE SÉLECTION DES APPLICATIONS

Cette section présente la méthodologie retenue pour sélectionner deux applications à analyser. Nous y précisons le périmètre, les sources consultées, les critères d'inclusion et

d'exclusion, ainsi que la grille d'évaluation utilisée. Sur cette base, nous justifions le choix de KLIMA (compensation + coaching) et du WWF Footprint Calculator (calculateur éducatif par questionnaire) comme deux archétypes complémentaires. L'objectif est d'assurer la traçabilité des choix, la représentativité des modèles et la pertinence des comparaisons effectuées dans l'analyse critique qui suit.

3.2.1 CONCEPTION METHODOLOGIQUE

Nous avons adopté une démarche de revue exploratoire structurée pour cartographier les applications grand public de sensibilisation climatique, puis nous avons procédé à un échantillonnage raisonné afin de retenir deux archétypes représentatifs :

- a) une application de compensation + coaching (KLIMA) ;
- b) un calculateur éducatif par questionnaire (WWF).

La rédaction et la traçabilité suivent les principes PRISMA 2020 et l'extension PRISMA-ScR (checklist scoping), adaptés à un corpus d'applications numériques. (Matthew, McKenzie, & Bossuyt, 2021)

3.2.2 SOURCES ET STRATEGIE DE RECHERCHE

- **Bases académiques** : Google Scholar, ScienceDirect (requêtes : *“personal carbon footprint calculator review”*, *“climate mobile app behavior change”*, *“compensation app carbon footprint”*).
- **Littérature qualifiée** : évaluations institutionnelles et de consommateurs (par exemple, conseils locaux, organismes de consommateurs) et pages officielles des produits.

- **Magasins d'applications** : iOS et Android (vérification de disponibilité).
- **Méthodologie d'élargissement** : à partir des premières études retenues, nous avons exploré leurs bibliographies (références citées) ainsi que les articles qui les citent afin d'identifier d'autres travaux pertinents, plus récents le cas échéant. Cette stratégie a permis d'intégrer des sources tierces à visée évaluatives :

- a) Une évaluation institutionnelle au Royaume-Uni comparant plus de 15 calculateurs et recommandant le WWF Footprint Calculator pour son utilisabilité et sa couverture des quatre domaines (North & Hertfordshire, 2021)
- b) Un test d'une organisation de consommateurs en Allemagne portant sur KLIMA (points forts, limites, modèle d'abonnement).
- c) Des revues scientifiques analysant la conception et les limites méthodologiques des calculateurs individuels. Les références détaillées figurent en bibliographie (Mulrow, Machaj, Deanes, & Derrible, 2019).

3.2.3 CRITERES D'ELIGIBILITE

- **Inclusion (grand public)** : outils actifs et accessibles (Web ou application), destinés au grand public, évaluation tierce disponible (rapport public), dimension pédagogique (explications, conseils), méthode de calcul décrite au moins sommairement (domaines, facteurs, frontières). (North & Hertfordshire, 2021).

- **Exclusion** : Service abandonné ou sans vérification d'activité, absence de sources indépendantes crédibles, opacité complète sur la méthode.

3.2.4 GRILLE D'EVALUATION (QUALITE, IMPACT, TRANSPARENCE)

Pour chaque candidat, une grille multicritère a été appliquée ; elle intègre des instruments reconnus pour les applications et leurs interventions comportementales.

- a) Qualité de l'application (fiabilité, expérience utilisateur, information) :
Mobile App Rating Scale (MARS) ; utilisation possible de l'uMARS pour les retours des utilisateurs (Stoyanov, et al., 2015).
- b) Composantes de changement de comportement : présence de Behavior Change Techniques (BCT : objectifs, feedback, comparaison sociale, renforcement, etc.) (Michie, et al., 2013).
- c) Transparence méthodologique du calcul : domaines couverts, facteurs d'émission, frontières du système, cohérence et comparabilité (constat de variabilité entre calculateurs dans la littérature) (Mulrow, Machaj, Deanes, & Derrible, 2019).
- d) Personnalisation et sources de données : données autodéclarées vs. données contextuelles ; potentiel d'amélioration, par exemple, la détection des modes de transport (Andersson, Nässén, & al., 2020)
- e) Efficacité potentielle et engagement : gamification, rappels, parcours éducatifs (Biørn-Hansen, Katzeff, & Eriksson, 2022)

En conclusion, cette section a explicité le périmètre, les sources et les critères qui ont guidé la sélection des cas d'étude. Sur cette base, deux applications représentatives ont été retenues (**KLIMA, WWF Footprint Calculator**). La section suivante présente les outils en détail et analyse les forces et les limites des applications au regard des objectifs de sensibilisation et du changement de comportement.

3.3 APPLICATIONS MOBILES LIEES AU DEREGLEMENT CLIMATIQUE.

Cette section examine les solutions existantes, en mettant l'accent sur les applications mobiles de suivi de l'empreinte carbone et les initiatives éducatives liées au dérèglement climatique, telles que **Klima**, une application, qui vous permet de devenir neutre en carbone immédiatement et durablement. Klima vous aide à compenser vos émissions, à réduire votre empreinte carbone et à multiplier votre impact climatique. Voici comment :

- **Compenser** : calculez votre empreinte carbone. Compensez ensuite vos émissions en soutenant des projets climatiques vérifiés qui suppriment ou réduisent les mêmes émissions ailleurs.
- **Réduire** : obtenez des conseils personnalisés pour vivre en respectant l'environnement. Engagez-vous à adopter des changements de mode de vie efficaces et réduisez vos émissions étape par étape.
- **Multipliez** : inspirez vos amis et observez votre impact en tant que leader du changement. Voyez exactement combien de CO₂ est économisé grâce à votre plaidoyer et à son effet multiplicateur (Markus, 2019).

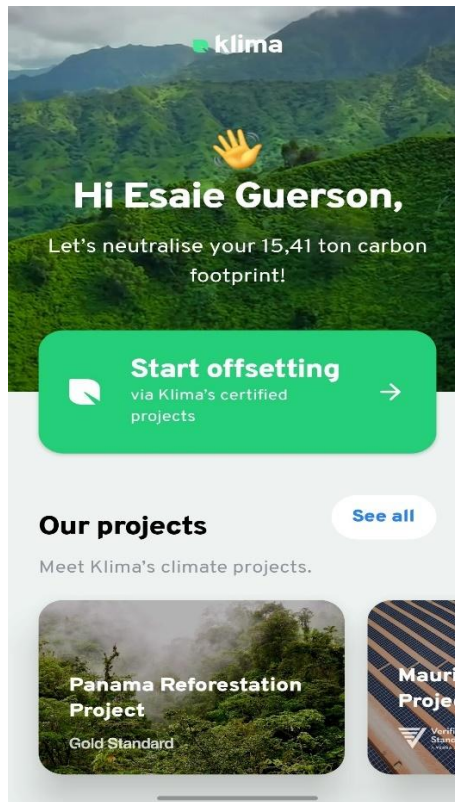


Figure 4 : Interface de l'application KLIMA- écran de calcul de l'empreinte carbone

Une autre solution innovante, le **WWF Footprint Calculator**, se distingue comme une application éducative permettant aux utilisateurs de calculer leur empreinte carbone. Grâce à un questionnaire interactif, elle aide les utilisateurs à comprendre comment leurs habitudes de consommation (alimentation, transport, énergie) impactent l'environnement. Bien que simple et accessible, cette application repose sur des saisies manuelles et offre peu de recommandations personnalisées, limitant son efficacité à encourager des changements durables. (ONG, 2006).

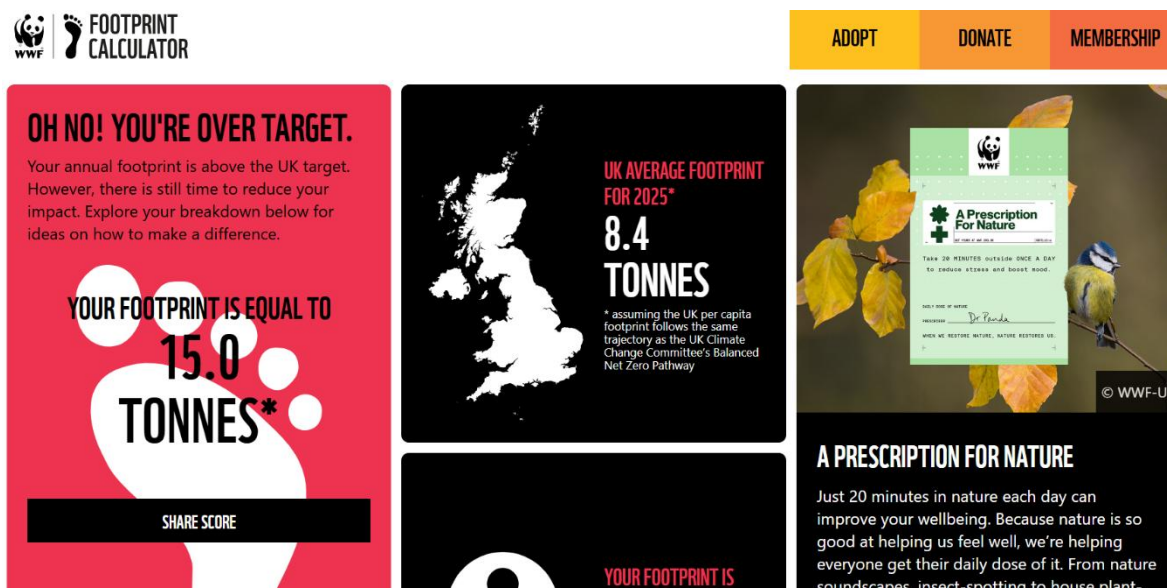


Figure 5 : Interface de l'application WWF footprint Calculator- écran de calcul de l'empreinte carbone

3.4 EVALUATIONS DES LIMITES DES OUTILS DE SENSIBILISATION EXISTANTS.

Limites des solutions existantes

Malgré leur potentiel, des applications comme KLIMA et WWF Footprint Calculator présentent certaines limites en matière d'accessibilité, de personnalisation et de transparence. Une analyse critique s'avère donc nécessaire pour en dégager les principaux enjeux.

KLIMA

- **Manque de personnalisation et adaptation au profil utilisateur :** l'une des critiques récurrentes exprimées par les utilisateurs de KLIMA concerne le manque de personnalisation des recommandations fournies. Ces suggestions, bien que bien intentionnées, demeurent souvent génériques, peu contextualisées et déconnectées

des réalités individuelles (localisation, habitudes de vie, contraintes). Ces limites sont cohérentes avec les constats de la littérature évaluant les calculateurs d'empreinte : hétérogénéité des méthodes et faible granularité conduisant à des conseils peu personnalisés (Mulrow, Machaj, Deanes, & Derrible, 2019)



Léandre Märkisch

J'adore la simplicité du produit ! Je préférerais néanmoins une application web, car le téléchargement d'une autre application est fastidieux. Je souhaite simplement compenser mon empreinte carbone, sans trop y penser, comme je le fais déjà grâce aux dons (<https://secure.givewell.org/>).

👍 Vote positif (1) 📄 Rapport 🔄 Partager ⌚ il y a 4 ans

Figure 6 : commentaire de Léandre Märkisch (Märkisch, s.d.)

- **Absence de contrôle direct et d'application active de l'utilisateur dans les actions climatiques** : malgré la simplicité d'utilisation et la qualité du design, plusieurs utilisateurs expriment une frustration liée à leur manque d'implication réelle dans les projets soutenus, ce qui peut générer un sentiment de passivité. La littérature signale en outre que les mécanismes de compensation peuvent parfois induire des effets de « moral licensing », réduisant l'effort perçu pour des actions directes de réduction (Günther, Staake, Schöb, & Tiefenbeck, 2020). Les utilisateurs ne savent pas toujours comment agir concrètement au quotidien pour réduire leur empreinte.



Claudio Codispoti

@markusgilles Salut Markus, merci pour ta réponse. Je ne suis pas sûr que toutes tes affirmations soient correctes, mais j'ai compris ce que tu voulais dire et quel est ton objectif avec ce produit. Je crains que cela ne devienne un distributeur de sérotonine pour les personnes ignorant les émissions. Je suivrai l'évolution de la situation en espérant trouver des informations plus fiables sur ton site web. Bonne continuation et bonne année professionnelle.

👍 Vote positif 📄 Rapport 🔄 Partager ⌚ il y a 4 ans

Figure 7 : Commentaire de Claudio Codispoti (Codispoti, s.d.)

WWF Footprint Calculator.

Manque de précision et de personnalisation dans les outils grand public : Bien que le WWF Footprint Calculator couvre les quatre grandes catégories de l’empreinte carbone telles que le transport, le logement et l’alimentation. À travers un questionnaire interactif et accessible, certaines limites méthodologiques ont été révélées. En effet, le format proposé repose exclusivement sur des questions à choix multiples, ne permettant pas la saisie des données réelles telles que le nombre de kilomètres parcourus, les relevés de consommation énergétique ou des informations détaillées sur les habitudes d'achat. Cette approche simplifiée, bien qu'utile pour la sensibilisation du grand public, réduit la précision des résultats obtenus et limite la personnalisation des recommandations. Comme le souligne le North Hertfordshire Council dans son évaluation comparative des calculateurs d’empreinte carbone : « il est reconnu que le WWF Footprint Calculator ne permet pas de réponses approfondies comme certains autres calculateurs. Cela est principalement dû à des questions à choix multiples. » (North & Hertfordshire, 2021).

Cette observation met en lumière la nécessité de développer des outils capables d'intégrer des données personnalisées et contextuelles pour accompagner efficacement les utilisateurs vers des comportements durables.

3.5 SYNTHÈSE DES LIMITES OBSERVÉES ET JUSTIFICATION D'UNE SOLUTION INNOVANTE.

L’analyse critique des approches actuelles en matière de sensibilisation au dérèglement climatique met en lumière les limites structurelles, fonctionnelles et comportementales qui freinent leur portée réelle. Des applications pourtant prometteuses comme **KLIMA** et **WWF Footprint Calculator** montrent rapidement leurs limites : manque de personnalisation des

recommandations, accessibilité restreinte (modèle payant ou interface peu inclusive), il y a aussi qu'une transparence insuffisante sur les données ou les actions soutenues. Parallèlement, les outils éducatifs interactifs font défaut, tandis que l'intégration des technologies mobiles dans les démarches pédagogiques reste limitée. L'information environnementale, quant à elle, demeure trop souvent dispersée, technique ou inaccessible au grand public.

Ces lacunes sont d'autant plus préoccupantes qu'elles touchent les publics les plus vulnérables : ceux qui manquent de temps, de connaissances écologiques ou de moyens d'agir efficacement. Sur le plan comportemental, la résistance au changement, l'absence de retour personnalisé et le manque d'incitations continues limitent fortement l'engagement durable des individus.

Ces constats révèlent un besoin urgent en matière d'outils pédagogiques accessibles et adaptés, ce qui justifie pleinement le développement d'une solution éducative plus inclusive, intelligemment personnalisée, géographiquement contextualisée qui est fondée sur des mécanismes pour accompagner progressivement les utilisateurs vers des comportements écoresponsables. C'est dans cette perspective qu'a été conçue la solution développée dans ce mémoire, que le prochain chapitre suivant présente en détail.

3.6 TABLEAU COMPARATIF DES APPLICATIONS EXISTANTES ET DE LA SOLUTION PROPOSEE.

CRITERES	KLIMA	WWF FOOTPRINT CALCULATOR	SOLUTION PROPOSEE
MODELE ECONOMIQUE	Payant(abonnement)	Gratuit	Gratuit et accessible à tous
CALCUL DE L'EMPREINTE CARBONE	Oui (Calcul initial + compensation)	Oui (Calcul via questionnaire)	Oui (calcul dynamique, automatique avec IA + données utilisateur).
PERSONNALISATION DES RECOMMANDATIONS	Faible	Faible	Elevée (géolocalisation comportements, habitudes de transport)
CIBLE UTILISATEUR	Grand public, adulte	Grand public	Curieux écologique, parent responsable, enseignant, militant.
UTILISATION DE L'IA ET GEOLOCALISATION	Non	Non	Oui (Tensorflow Lite, Google Location API)
APPROCHE EDUCATIVE	Modérée	Faible	Forte (Notifications, texte de recommandations)
SUIVI ET ENGAGEMENT UTILISATEUR	Faible	Faible	Élevé (Historique, feedback, suivi de progression)
INTERACTIVITE	Moyenne	Faible (Principalement Questionnaire)	Elevée (Tableau de bord, défis, contenu éducatif, micro-persuasion)

Tableau 1 : Tableau comparatif des applications existantes et de la solution proposée.

3.7 ÉLÉMENTS CLES IDENTIFIÉS POUR GARANTIR LA VIABILITÉ D'UNE SOLUTION EDUCATIVE MOBILE.

Face à ces défis environnementaux, sociaux et économiques, il est essentiel de sensibiliser et encourager chaque individu à entreprendre des actions concrètes pour réduire son empreinte écologique. En complément de ces solutions, le projet intitulé « Technologies Mobiles éducatives pour la sensibilisation et la réduction de l'Empreinte Carbone liée au Réchauffement Climatique » s'inscrit dans cette dynamique, tout en apportant des innovations clés :

- **Calcul de l'empreinte Carbone** : des outils pour calculer l'empreinte carbone individuelle grâce à des outils interactifs à partir des habitudes de vie, notamment les modes de transport et la gestion des déchets.
- **Recommandations Personnalisées** : suggestions d'actions concrètes pour réduire l'empreinte carbone, adaptées à la localisation géographique et aux habitudes de transport.
- **Contenu Éducatif** : articles, vidéos et actualités climatiques pour informer les utilisateurs sur les causes et les conséquences du réchauffement climatique.

Perspectives :

L'avenir de la lutte contre le dérèglement climatique s'inscrit dans une dynamique de transformation profonde, portée à la fois par les avancées technologiques et par une volonté politique et citoyenne d'engagement. À l'avenir, l'intégration poussée de l'intelligence artificielle et du big data dans les outils de sensibilisation offre de nouvelles possibilités pour analyser, prédire et personnaliser les recommandations en matière de comportement durable.

De plus, l'évolution des capteurs mobiles et des systèmes d'énergie verte offrira de nouvelles opportunités pour enrichir l'expérience utilisateur. À terme, l'ambition est de rendre l'application plus prédictive, interactive et inclusive, afin de contribuer de manière concrète aux efforts collectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Ainsi, face aux limites identifiées dans les solutions existantes et aux perspectives technologiques prometteuses, le développement d'une application mobile éducative innovante s'impose comme une réponse pertinente. Le chapitre suivant présente en détail la conception de cette solution, ses objectifs, ses fondements méthodologiques ainsi que les choix techniques retenus.

CHAPITRE 4

CONCEPTION DE LA SOLUTION MOBILE CENTREE UTILISATEUR.

À partir des caractéristiques définies, ce chapitre présente la démarche de conception de l'application mobile éducative ainsi que l'analyse des besoins des utilisateurs. Il s'appuie sur des personas, les exigences fonctionnelles et non fonctionnelles, les outils technologiques et ensuite les méthodologies employées.

Comme notre application vise en premier lieu à sensibiliser, il est important de concevoir un produit qui correspondra exactement aux besoins de certains groupes d'utilisateurs. Pour cela, dans cette section nous allons présenter les archétypes des personnes qui pourraient être intéressées par l'utilisation de notre application.

4.1 ANALYSE DES UTILISATEURS CIBLES : PERSONAS

Un persona est une description fictive, mais réaliste, d'un utilisateur type ou cible du produit. Il sert à susciter l'empathie, à accroître la notoriété et la mémorisation auprès des utilisateurs cibles, à prioriser les fonctionnalités et à éclairer les décisions de conception. (Joni, Kathleen, Soon-Gyo, & Bernard, 2022)

4.1.1 METHODOLOGIE EMPLOYEE POUR ARRIVER A IDENTIFIER CHAQUE PERSONAS.

La construction des personas repose sur une approche issue des principes du **Design Thinking** et du **Design centré utilisateur**, tels que recommandés par l'**Interaction Design Foundation**. (Lene, 2024)

Dix (10) étapes constituent un processus idéal tel que décrit par **Lene Nielsen** dans son article de l'encyclopédie « **Personas** » de l'Interaction Design Foundation. (Rikke & Teo, 2025)

Dans ce projet, les personas ont été élaborés selon les étapes suivantes :

- **Collecte des données.**

Nous avons mené une étude et une analyse des outils existants (**KLIMA, WWF Footprint Calculator**) pour comprendre les comportements, besoins et motivations récurrents.

- **Formulation d'hypothèses.**

A partir des observations recueillies, des hypothèses sur les différents profils utilisateur ont été formulées.

- **Tout le monde accepte l'hypothèse.**

Les hypothèses ont été croisées avec des tendances générales issues de recherches UX pour s'assurer qu'elles couvrent différents types de publics concernés par écologie et la mobilité durable.

- **Description des personas.**

Chaque persona a été décrit de manière complète, en intégrant des éléments tels que l'âge, la profession, le niveau de connaissance écologique, les besoins, les motivations et les barrières. Cette démarche suit les recommandations de Nielsen.

- **Création des scénarios d'utilisation.**

Les personas serviront de base pour imaginer des scénarios d'interaction avec l'application mobile, afin de guider les décisions de conception. (Rikke & Teo, 2025)
(Lene, 2024)

4.1.2 PRESENTATIONS DES PERSONAS CIBLES.

Persona 1 : Le curieux écologique.

Profil :

- Age : 25 – 40 ans.
- Profession : Salarié, entrepreneur ou indépendant.
- Niveau de connaissances : Faible à moyen en écologie.

Besoins :

- Comprendre son empreinte carbone et comment la réduire.
- Découvrir des actions simples, rapides et pratiques pour un impact immédiat.

Motivations :

- Vouloir adopter des habitudes plus respectueuses de l'environnement.
- Sentiment de contribuer à une cause importante sans effort.

Barrières :

- Perception que les actions individuelles sont insignifiantes.
- Manque de temps pour s'engager activement.

Persona 2 : Le parent responsable.

Profil :

- Age : 30 – 45 ans.
- Profession : Salarie ou parent au foyer
- Niveau de connaissances : Moyen à avancé.

Besoins :

- Eduquer ses enfants sur les pratiques écologiques.
- Réduire l'impact environnemental de sa famille.

Motivations :

- Créer un foyer durable et enseigner des valeurs importantes à ses enfants.
- Protéger la planète pour les générations futures.

Barrières :

- Difficulté à intégrer des habitudes écologiques dans le quotidien familial.
- Manque de temps pour chercher des informations fiables.

Persona 3 : L'enseignant ou Educateur engagé.

Profil :

- Age : 30 – 55 ans.
- Profession : Enseignant, éducateur ou responsable scolaire.
- Niveau de connaissances : Moyen à avancé.

Besoins :

- Disposer d'outils pédagogiques interactifs pour sensibiliser les élèves.
- Intégrer l'écologie dans les programmes scolaires.

Motivations :

- Former une génération consciente des enjeux environnementaux.
- Rendre les cours engageants et interactifs.

Barrières :

- Manque de ressources adaptées pour les jeunes publics.
- Temps limite pour élaborer des contenus éducatifs sur l'écologie.

Persona 4 : Le militant écologique.

Profil :

- Age : 18 – 50 ans.
- Profession : Membre d'une organisation ONG.
- Niveau de connaissances : Avancé.

Besoins :

- Obtenir des données précises pour mesurer son impact carbone.
- Inspirer et motiver d'autres personnes à adopter des comportements responsables.

Motivations :

- Contribuer activement à la lutte contre le réchauffement climatique.
- Être un modèle de durabilité et d'engagement pour sa communauté.

Barrières :

- Besoins d'outils fiables pour convaincre et mobiliser.
- Manque d'accès à des recommandations contextualisées pour ses actions.

4.2 ÉVALUATION ÉCOLOGIQUE PERSONNALISÉE ET PROFILS COMPORTEMENTAUX.

Pour proposer des recommandations utiles et adaptées, l'application doit comprendre la situation écologique de chaque utilisateur. Cette section présente comment l'évaluation personnalisée est réalisée, en tenant compte des habitudes, du contexte de vie et du niveau de

sensibilisation. Elle permet aussi de définir les profils types pour mieux adapter les conseils et encourager des comportements plus durables.

4.2.1 METHODE D'ÉVALUATION DE L'EMPREINTE CARBONE INDIVIDUELLE.

L'évaluation de la situation écologique est un processus important qui intègre des considérations environnementales tout en prenant en compte les caractéristiques du milieu humain. Ce processus permet de traiter, d'analyser et d'interpréter les impacts afin d'évaluer l'acceptabilité environnementale des projets et de préparer les décisions dans le cadre de la lutte contre le réchauffement climatique. Cette démarche vise à sensibiliser les individus à leurs émissions de gaz à effet de serre (GES) pour encourager des pratiques plus durables. L'évaluation s'appuie sur des critères mesurables, tels que la consommation énergétique, les habitudes alimentaires et les modes de transport. Ces critères offrent une vision de l'empreinte carbone d'une personne et constituent des points forts pour proposer des recommandations personnalisées. (Marie-Guyart, 2024)

Selon l'avis sur l'impact environnemental des universités, il est tenu compte de toutes les émissions de GES de manière directe et indirecte, tout en prenant en compte les périmètres organisationnels et opérationnels. Cette approche encourage des campagnes de sensibilisation auprès des membres de la communauté universitaire peuvent aussi être menées, notamment auprès des membres consommant le plus d'énergie pour adopter des pratiques plus durables et de sensibiliser les individus à leur empreinte carbone. (Alex Latulipe, 2021).

Dans la section suivante, nous présentons les approches personnalisées de la situation écologique pour l'évaluation.

4.3 APPROCHE PERSONNALISÉE DE LA SITUATION ÉCOLOGIQUE POUR L'ÉVALUATION.

L'objectif de l'approche personnalisée est d'ajuster l'évaluation écologique en fonction de chaque individu ou groupe d'individus, en prenant en considération leurs particularités contextuelles et comportementales, cette approche s'appuie sur une étude approfondie des modes de vie, des éléments environnementaux locaux et des outils sur mesure pour sensibiliser et offrir des solutions appropriées.

4.3.1 CARACTERISTIQUE DE LA PERSONNE.

- **Profil socio-économique** : Accès à des infrastructures écologiques, capacité à investir dans des solutions durables.
 - **Contexte familial** : Familles avec jeunes enfants ou personnes à charge, influencent les choix de transport ou les pratiques domestiques.
 - **Santé et mobilité** : Personnes à mobilité réduite ou ayant des besoins spécifiques, nécessitant des infrastructures adaptées.
 - **Position géographique** : Localisation en zone urbaine, rurale ou isolée influençant l'accès aux transports publics, aux espaces verts et aux services.
 - **Sensibilité climatique** : Niveau de conscience environnementale ou vulnérabilité aux impacts climatiques locaux comme les vagues de chaleur ou les inondations.
- (Ahmed & Mawada, 2025)

4.3.2 PARTICIPATION ACTIVE DES INDIVIDUS.

Dans le document de Martin Daue il parle de l'initiative concernant les élèves secondaire montre qu'un calculateur interactif peut sensibiliser plus de 85 % des participants à leurs émissions de GES et l'inciter à adopter des comportements plus durables. (Daue, 2024)

Résultats attendus.

1. Réduction mesurable de l'empreinte carbone.
2. Adoption de comportements durables.
3. Sensibilisation et encouragement à la réduction des émissions de GES.

4.4 CRITÈRES POUR L'ÉVALUATION.

L'évaluation personnalisée intègre une combinaison de critères pour mesurer l'empreinte carbone de manière précise.

1. **Habitudes alimentaires :** Consommation des produits locaux ou importes. (Daue, 2024)
2. **Modes de transport :** Utilisation des véhicules personnels, transports en commun, vélos ou marche. (Pamela, 2011)
3. **Consommation énergétique :** Utilisation d'énergies renouvelables, analyse des pratiques domestiques. (Daue, 2024)
4. **Gestion des déchets :** tri, recyclage et réduction des déchets. (Pamela, 2011)

4.5 CRÉATION D'UN PROFIL ÉCOLOGIQUE PERSONNALISÉ ET LES STRATEGIES DE MICRO ET MACRO-PERSUASION.

Dans une approche individualisée de l'élaboration du profil est essentielle. Le profil a pour objectif de caractériser chaque individu en fonction de ses comportements, de ses contraintes et aussi du contexte de l'environnement de l'individu. Ce profil permet de proposer des services, des recommandations et des solutions adaptées, tout en favorisant un comportement durable à travers des stratégies de micro et macro-persuasion.

4.5.1 LES CURIEUX ÉCOLOGIQUES.

La curiosité représente le désir intrinsèque d'une personne pour l'expérience et la connaissance. La curiosité implique de reconnaître, de poursuivre et de réguler activement son expérience en réponse aux opportunités stimulantes. De plus, la curiosité se présente comme un état mesurable dans une situation et à un moment donné, mais également sous la forme d'un trait de caractère relativement stable chez l'individu. (GAUTHIER, 2024)

Stratégies de persuasion écologique pour les curieux écologiques.

Il était essentiel d'adopter des méthodes qui tiennent compte les profils des utilisateurs, de leurs motivations et aussi de leurs limites. Dans le but d'accompagner efficacement les utilisateurs dans la transition vers les comportements plus durables. Dans ce contexte, la persuasion ne vise pas à imposer un changement, mais à influencer positivement la décision, en s'appuyant sur les mécanismes psychologiques subtils, adaptés à chaque utilisateur. L'application mobilise donc des stratégies de micro-persuasion (incitations discrètes et immédiates) et de macro-persuasion (influences à

plus long terme et structurée), afin de personnaliser l'accompagnement selon les persona définis précédemment.

1. Micro-Persuasion.

Notifications personnalisées.

Envoyer des rappels éducatifs adaptés aux habitudes de recherche et de consommation des curieux écologiques, comme des conseils quotidiens ou des anecdotes sur les bénéfices d'actions climatiques simple.

2. Macro- Persuasion.

Participation à des initiatives collectives.

Proposer au curieux écologique de s'engager dans des projets locaux ou communautaires, comme des ateliers de sensibilisation.

4.5.2 LES PARENTS RESPONSABLES.

Consommer de façon plus authentique et plus responsable, limiter son empreinte sur la planète. En tant que parents, cette sensibilisation nous motive à prendre de nouvelles habitudes, plus saines pour la santé et respectueuses de l'environnement : équipement de la maison, produits d'entretien, modes de consommation, énergie. (Henri, 2020)

Stratégies de persuasion écologique pour les parents responsables.

1. Micro-Persuasion.

Donner des rappels pour montrer à vos enfants comment faire pour réduire leur empreinte carbone.

2. Macro- Persuasion.

Préparer des campagnes éducatives scolaires intégrant des ateliers sur la durabilité.

4.5.3 L'ENSEIGNANT OU EDUCATEUR ENGAGER.

L'éducation est la clé de la lutte contre le dérèglement climatique. L'éducation a le pouvoir d'encourager tout un chacun à changer d'attitude et de comportement et permet par ailleurs de prendre des décisions éclairées. L'école permet ainsi aux plus jeunes de découvrir les incidences du réchauffement climatique, tout en apprenant à s'adapter aux changements climatiques. (Future & LSF, 2016)

Les enseignants ou éducateur engagé jouent un rôle clé dans la sensibilisation des élèves ou étudiants aux enjeux climatiques. Stratégies de persuasion écologique pour les enseignants.

1. Micro-Persuasion

Notifications personnalisées.

Rappels pour utiliser des ressources interactives, comme des textes ou simple vidéo sur le dérèglement climatique. Encouragement tels que : « Partager un geste écologique avec vos élèves aujourd'hui »

2. Macro-Persuasion

Projets collectifs : Encourager les enseignants à organiser des activités scolaires comme des journée climatiques, des campagnes de plantation d'arbres ou des ateliers de recyclage impliquant toute l'école.

Evènement scolaires : Proposer des concours ou des expositions sur le climat pour impliquer les élèves, les enseignant et les familles.

4.5.4 MILITANT ECOLOGIQUE.

Les militants écologistes sont des personnes engagées dans la défense de l'environnement de la lutte contre le réchauffement climatique. On verra que trois types de trajectoires militantes émergent.

1. La révélation

Dans ce premier profil type, l'engagement écologique se produit à la suite d'une découverte ou d'une rencontre avec des idées, des savoirs ou encore une expérience esthétique. On peut parler d'une résonance qui prend la forme d'une révélation voire d'une épiphanie sur le plan intellectuel ou artistique.

2. La rupture

Dans ce second profil, l'engagement se fonde sur une rupture, un rejet, à l'égard d'une trajectoire sociale considérée comme aliénante. On pourrait donc dire qu'il y a aussi une sorte de révélation au principe de cette forme d'engagement. Cependant, celle-ci ne porte pas tant sur le problème écologique, que sur le mode de vie antérieur de la personne concernée.

3. L'attachement.

Dans ce troisième profil, l'engagement écologique est le fruit d'un attachement ou d'une fidélité à l'égard d'expériences de résonance vécue souvent dans l'enfance. Cette résonance a pu être éprouvée très jeune vis-à-vis de la nature ou de valeurs de justice.

Ces profils montrent que les militants peuvent être motivés par des expériences éducatives, des environnements familiaux ou sociaux, et des opportunités pour exprimer leur passion dans des actions collectives ou individuelles. (Evelyn, 2020)

Stratégies de persuasion écologique pour les militants.

1.Macro-Persuasion.

Mobiliser les militant à travers des campagnes collectives, des récits inspirants et des initiatives communautaires.

2.Micro-Persuasion.

Renforcer leurs engagements personnels avec des messages ciblés. Des indicateurs d'impact et de contenus émotionnels.

4.6 DEFINITION DES EXIGENCES FONCTIONNELLES ET NON FONCTIONNELLES.

Sur la base des problèmes identifiés, les exigences fonctionnelles et non fonctionnelles du produit sont établies pour répondre aux besoins des utilisateurs.

4.6.1 EXIGENCES FONCTIONNELLES.

- **Calcul de l'empreinte carbone.**

Transport : L'application est capable de calculer l'empreinte carbone liée aux déplacements des utilisateurs en fonction de leur mode de transport (voiture, vélo, transport en commun).

Détails du calcul : L'application pourra détecter automatiquement son mode de transport grâce à des technologies comme Tensorflow Lite (pour la reconnaissance d'activité).

Données d'entrée : Mode de transport utilisé.

Résultat attendu : L'application affiche l'empreinte carbone totale pour les déplacements sur une période donnée (quotidien, hebdomadaire, mensuel).

- **Sensibilisation et éducation.**

Régulièrement l'application envoie des notifications pour rappeler aux utilisateurs de prendre des actions contre le réchauffement climatique. Notifications basées sur les habitudes de l'utilisateur, telles que réduire l'utilisation de l'énergie dans certaines situations, prendre des transports en commun ou marcher plutôt que d'utiliser des véhicules à fortes émissions et réduire les déchets et participer au recyclage.

Résultat attendu : L'application incite régulièrement les utilisateurs à prendre des décisions et à agir pour réduire leur empreinte carbone.

- **Recommandations personnalisées**

L'application propose des actions spécifiques et personnalisées pour chaque utilisateur afin de réduire leur empreinte carbone. En premier lieu l'application analysera les données personnelles de chaque utilisateur comme la localisation, les habitudes de transports, les déchets pour proposer des recommandations adaptées ensuite recommandation dynamique basée sur le comportement des utilisateurs. Lorsque l'utilisateur utilise beaucoup son véhicule, l'application proposera des alternatives comme le covoiturage ou les transports en commun.

Résultat attendu : Chaque utilisateur reçoit des recommandations adaptées à ses habitudes et à son environnement pour adopter des comportements plus écologiques.

- **Actualités climatiques.**

L'application a une section dédiée à informer régulièrement les utilisateurs sur les nouvelles récentes liées au dérèglement climatique. Comme les phénomènes

météorologiques récents : Les tempêtes, les inondations ou les vagues de chaleur qui affectent différentes régions du monde.

4.6.2 EXIGENCES NON-FONCTIONNELLES.

Performance : L'application répond aux attentes des utilisateurs de manière fluide et rapide, répond rapidement aux actions de l'utilisateur, utilise judicieusement les ressources de l'appareil, et fonctionne de manière stable sans interruption ni erreurs.

Fiabilité : L'application est stable et fonctionne dans différents contextes. Les fonctionnalités importantes de l'application telles que le calcul de l'empreinte carbone et les notifications fonctionnent sans interruption.

Expérience utilisateur (UX) : L'application offre une expérience utilisateur fluide, intuitive et agréable. Le temps de réponse est court, Les interactions simples, et la navigation facile à comprendre.

Maintenabilité : L'application est facile à mettre à jour et à maintenir. La structure du code permet d'ajuster et d'apporter des corrections rapides. Que ce soit pour corriger des bugs ou pour ajouter de nouvelles fonctionnalités.

Efficacité énergétique : L'application est conçue pour minimiser la consommation d'énergie en particulier sur les appareils mobiles. Cela inclut l'optimisation des ressources utilisées par l'application (processeur, mémoire, batterie), notamment pour les fonctionnalités gourmandes en énergie comme la géolocalisation en temps réel et l'analyse des comportements des utilisateurs.

4.7CHOIX TECHNOLOGIQUES ET JUSTIFICATION.

Le choix des technologies utilisées dans le projet découle directement des besoins exprimés dans les sections précédentes analyse des personas, exigences fonctionnelles et exigences non fonctionnelles. Chaque outil a été sélectionné après une comparaison avec des alternatives, afin d'assurer la performance, la pertinence fonctionnelle, la maintenabilité et l'adéquation avec les contraintes mobiles.

Langage de développement : Kotlin, avec Jetpack Compose pour l'interface utilisateur.

Back-end : Firebase pour la gestion des données.

TensorFlow Lite : pour l'intégration de fonctionnalités de machine learning.

Géolocalisation : Google Maps API pour fournir des recommandations basées sur l'emplacement géographique des utilisateurs.

La reconnaissance d'activité : Permet de détecter et de classifier les activités courantes des utilisateurs, comme marcher, courir, conduire, ou être assis.

Google Location Services API : Permet de suivre la position de l'utilisateur en temps réel. Pour calculer la distance parcourue lors des déplacements quotidiens (à pied, en voiture, à vélo, etc.) et estimer les émissions de CO₂ basées sur le mode de transport.

Google Maps Distance Matrix API : Permet de calculer la distance entre deux points géographiques, ce qui peut être utilisé pour estimer les émissions de CO₂ en fonction du mode de transport.

SharedPreferences : Pour stocker localement les préférences et habitudes des utilisateurs, comme leur moyen de transport principal.

Justification générale.

Le développement de l'application mobile ECO repose sur une sélection technologique alignée avec ses objectifs de performance, d'accessibilité, de personnalisation et de durabilité. Le choix du langage **Kotlin**, recommandé par Google pour le développement Android natif, garantit la compatibilité avec l'écosystème Android et la sécurité du code grâce à la gestion stricte des valeurs nulles (null safety). L'intégration de **Jetpack Compose**, framework moderne de création d'interfaces déclaratives, facilite la conception d'interface utilisateur dynamique et adaptative, répondant aux besoins d'ergonomie d'identifiés dans l'analyse des personas (Aditya, 2025) . Pour la gestion et la synchronisation en temps réel des données, **Firestore** a été choisi pour sa robustesse, sa sécurité et sa facilité de déploiement. L'intégration de **Tensorflow Lite** permet l'exécution locale des modèles de **machine learning**, réduisant la dépendance à la connexion Internet et en préservant la confidentialité des données, conformément aux bonnes pratiques en matière d'application éducative mobile (Robert, Jared, & Advait, 2021).

Les modules **Google location services** et **Google Maps API** assurent une géolocalisation précise et fiable pour contextualiser les recommandations, Tandis que Google Maps Distance Matrix API permet un calcul exact des distances et des émissions de CO₂ associées (Paul & Sean, 2011). Enfin, **SharedPreferences** offre un stockage local léger, garantissant la continuité de l'expérience utilisateur hors ligne, conformément aux bonnes pratiques en gestion de données persistantes dans les

applications mobiles (Emad, Meiyappan, & Ahmed, 2024). Ce choix technologique, préféré face à des alternatives moins matures ou plus coûteuses en ressources, répond aux impératifs de performance, de sécurité, d'efficacité énergétique et de maintenabilité.

Ce chapitre présente la conception de l'application, à partir de profils utilisateurs(personas) définis selon une méthodologie centrée sur l'utilisateur. Il décrit ensuite une évaluation écologique personnalisée pour adapter les recommandations. Des stratégies de micro et macro-persuasion sont intégrées pour encourager les comportements durables. La section définit les exigences fonctionnelles et non fonctionnelles, et précise les choix technologiques retenus pour assurer la performance et la personnalisation de l'application.

CHAPITRE 5

IMPLEMENTATION ET VALIDATION DE LA SOLUTION

Après avoir défini la conception centrée utilisateur de l'application dans le chapitre précédent, ce chapitre présente l'implémentation concrète de la solution mobile, ainsi que les mécanismes prévus pour son fonctionnement, son suivi et sa validation. Il expose les parties fonctionnelles du système, la politique opérationnelle mise en place pour garantir une utilisation responsable et efficace, la structure du tableau de bord pour le suivi des comportements écologiques, ainsi que les modèles de conception logicielle (UML, cas d'utilisation, classes). Le chapitre décrit également les interfaces clés de l'application et les étapes méthodologiques du processus de développement. L'objectif est de démontrer la faisabilité technique de la solution, son alignement avec les exigences définies et sa capacité à accompagner l'utilisateur dans une transition vers des pratiques plus durables.

5.1 POLITIQUES OPERATIONNELLES DU SYSTEME.

Politiques opérationnelles

Nous déterminons comment le système sera utilisé et administré dans son environnement.

- **Accès à l'information :** Le système garantit que les différentes informations sur le réchauffement climatique et les actions à entreprendre soient accessibles de manière équitable à toutes les catégories d'utilisateurs, sans discrimination de statut socio-économique ou d'accès aux ressources technologiques.
- **Sensibilisation continue :** L'application adopte une politique de sensibilisation continue des utilisateurs avec des notifications régulières et des mises à jour de

contenus en temps réel afin de garder les utilisateurs engagés et informés sur les nouvelles pratiques écologiques et les événements.

- **Protection des données personnelles :** Les informations collectées par l'application notamment celles liées à la géolocalisation et aux habitudes utilisateurs, doivent être protégées en conformité avec les lois de protection de données personnelles.
- **Respect des lois de l'environnement :** En matière de gestion des déchets, de pollution et d'émission de gaz à effet de serre. L'application respecte les lois et règlements.

5.2 TABLEAU DE BORD POUR VISUALISER LES CRITERES ET IDENTIFIER LES POINTS A AMELIORER.

Le Tableau de bord vise à offrir une visualisation intuitive et interactive des critères liés à l'empreinte carbone et aux comportements écologiques des utilisateurs. Il permet d'analyser les données en temps réel et de suivre les progrès effectués en matière de réductions des émissions CO₂.

- **Affichage en temps réel :** Présentation instantanée et claire des données essentielles liées à l'empreinte carbone.
- **Sensibilisation écologique :** Incitation aux comportements durables grâce à des indicateurs visuels et des retours personnalisés.
- **Expérience utilisateur personnalisée :** Adaptation des informations en fonction du profil de l'utilisateur (par exemple curieux écologique, parent responsable, enseignant, militant).

- **Dynamique collective** : Encouragement à participer à des défis et initiatives écologiques communautaires pour un impact collectif.

5.3 STRUCTURE DU TABLEAU DE BORD.

Le Tableau de bord est structuré en plusieurs sections interactives :

Suivi de l’empreinte carbone.

1. Estimation des émissions de CO₂ générées en fonction du mode de transport utilisé (transport).
2. Comparaison avec des moyennes locales et nationales.
3. Historique des déplacements et de l’impact écologique associé.

Analyse des modes de transport.

1. Détection automatique du mode de transport via intelligence artificielle et capteurs mobiles.
2. Estimation des distances parcourues et des émissions de CO₂ correspondantes.
3. Suggestions d’alternatives plus écologiques en fonction des habitudes de déplacement.

Suivi des actions écologiques et engagement.

1. Historique des trajets et actions prises pour réduire l’empreinte carbone.
2. Evaluation de l’impact environnemental des changements de mode de transport.
3. Notifications intelligentes rappelant les options de transport plus durables.
4. Défis et classements des utilisateurs selon leur engagement écologique.

Objectifs personnalisés et feedback dynamique.

1. Définir les objectifs personnels pour réduire les émissions liées aux déplacements.
2. Suivi des progrès avec des indicateurs dynamiques et suggestions d’amélioration.
3. Recommandations automatisées pour optimiser l’impact écologique des trajets.

Système de géolocalisation et recommandations contextuelles.

1. Suggestion d'itinéraires plus écologiques en fonction de la position géographique.
2. Informations locales sur la qualité de l'air et impact des modes de transport.
3. Carte interactive illustrant l'impact collectif des utilisateurs par zone géographique.

Contenu éducatif et sensibilisation.

1. Accès aux articles et vidéos éducatives sur les modes de transport durables.

5.4 ARCHITECTURE LOGICIELLE

L'architecture logicielle de l'application repose sur une approche modulaire respectant le pattern MVVM (Model-View-ViewModel), largement utilisé dans les applications mobiles modernes avec Jetpack Compose. Ce choix architectural permet de favoriser une séparation claire des responsabilités, une meilleure maintenabilité du code, ainsi qu'une meilleure scalabilité de la solution à long terme.

- **Choix de l'architecture : MVVM**

Le modèle MVVM a été sélectionné afin de distinguer clairement la logique métier (Model) de la logique d'affichage (View), de centraliser les données de l'interface et leur gestion d'état dans le ViewModel et aussi de s'assurer une réactivité fluide grâce à l'observation des données et, enfin, pour faciliter les tests unitaires et l'évolution du code.

- **Structure des modules.**

Le projet est divisé en 3 modules principaux, suivant une structure claire :

UI (User Interface) : contient les composants d'interface utilisateur (écrans, éléments visuels, animation).

ViewModel : gère les états de l'interface, les appels au cas d'usage et la logique de présentation.

Data & Model : regroupe les modèles de données, les services d'accès à firebase, les appels API, les classes liées à l'intelligence artificielle (exemple : détection du transport) et les opérations de persistance.

5.5 DIAGRAMME ET MODELES (UML, CAS D'UTILISATION).

5.5.1 CAS D'UTILISATION :

Le tableau de cas d'utilisation représente ce que le système propose aux utilisateurs.

CAS D'UTILISATION	DESCRIPTION
AUTHENTIFICATION	Créer un compte, se connecter et gérer son accès au système.
CONSULTER SON EMPREINTE CARBONE	L'utilisateur visualise ses émissions de CO ² en fonction de ses habitudes.
RECEVOIR DES RECOMMANDATIONS PERSONNALISEES	L'application propose des conseils adaptés pour réduire l'empreinte carbone.
SUIVRE SON HISTORIQUE DE TRANSPORT	L'utilisateur peut voir son historique de déplacements et l'impact environnemental.
VOIR DES INFORMATIONS SUR LE CLIMAT	L'utilisateur peut voir des informations sur le climat en fonction de la position géographique de l'utilisateur

Tableau 2 :Le tableau de cas d'utilisation représente ce que le système propose aux utilisateurs.

5.5.2 DIAGRAMME DE CAS D'UTILISATION(GRAPHIQUE).

Diagramme de cas d'utilisation

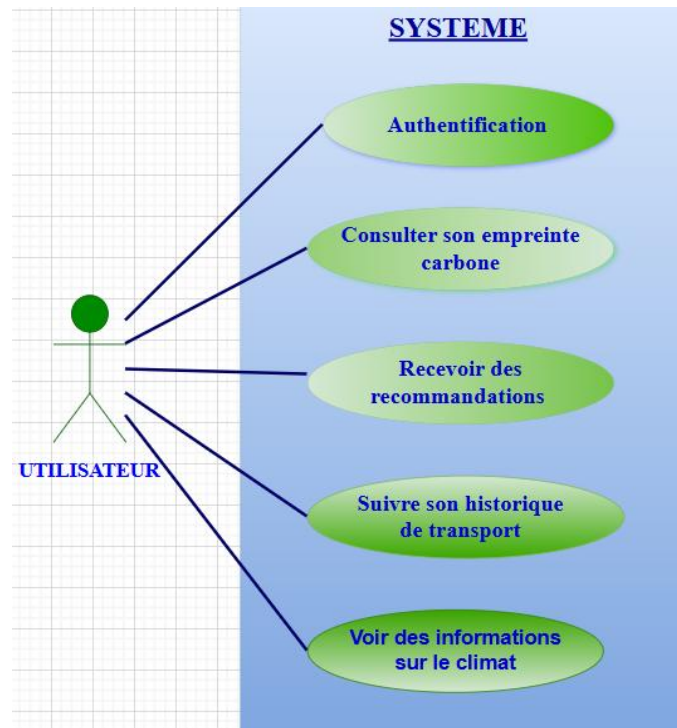


Figure 8 : Diagramme de cas d'utilisation

5.5.3 CLASSES PRINCIPALES :

- Utilisateurs :

✓ Attributs :

id: String, **fullName:** String, **email:** String, **location:** String, **income:** String-
family: String, **mobility:** String, **needs:** String, **persona:** String, **transport:** String,
waste: String, **energy:** String, **diet:** String, **climateAwareness:** String, **ecoActions:**
String

✓ Méthodes

calculerEmpreinteCarbone () , **recevoirRecommandations()**,
suivreHistoriqueTransport()

- **TransportEntry :**

- ✓ Attributs:

- timestamp: Int, transportMode: String**

- ✓ Methodes:

- enregistrerTransport()**

- **Recommandation.**

- ✓ Attributs :

- id: String, userId: String, date: Date, contenu: String, status: String**

- ✓ Méthodes :

- genererRecommandation() , envoyerRecommandation()**

- **Progression.**

- ✓ Attributs :

- id: String, userId: String, date: Date, empreinteCarboneActuelle: Float,**

- empreinteCarboneInitiale: Float, ameliorationPourcentage: Float.**

- actionsEffectuées: List.**

- ✓ Méthodes :

- calculerAmelioration (), genererStatistiques().**

5.5.4 UNIFIED MODELING LANGUAGE (UML)

Ce diagramme de classe représente la structure de base de l'application, montrant les principales entités et leurs relations.

1- Relation entre la classe *Utilisateurs* et *TransportEntry*.

- ✓ **Mot relationnel** : « *Enregistrer.* »
- ✓ **Cardinalité** : Un utilisateur (1) peut enregistrer plusieurs entrées de transport (0...*), mais une entrée de transport appartient à un seul utilisateur (1).

2- Relation entre la classe *Utilisateurs* et *recommandations*.

- ✓ **Mot relationnel** : « *Reçoit.* »
- ✓ **Cardinalité** : Un utilisateur (1) peut recevoir plusieurs recommandations (0...*), mais une recommandation appartient à un seul utilisateur (1).

3- Relation entre la classe *Utilisateurs* et *progression*.

- ✓ **Mot relationnel** : « *A* ».
- ✓ **Cardinalité** : Un utilisateur (1) peut avoir plusieurs suivis de progression (0...*), mais un suivi de progression est lié à un seul utilisateur (1).

4- Relation entre la classe *Recommandations* et *Progression*.

- ✓ **Mot relationnel** : « *Influence.* »
- ✓ **Cardinalité** : Une recommandation (1) peut influencer plusieurs progressions (0...), mais une progression peut être influencée par plusieurs recommandations (0...).

5- Relation entre la classe *TransportEntry* et *Progression*.

- ✓ **Mot relationnel** : « *Contribue a.* »

- ✓ **Cardinalité** : Une entrée de transport (1) peut contribuer à plusieurs suivis de progressions (0...), mais un suivi de progression est influencé par plusieurs entrées de transport (0...).

Diagramme UML

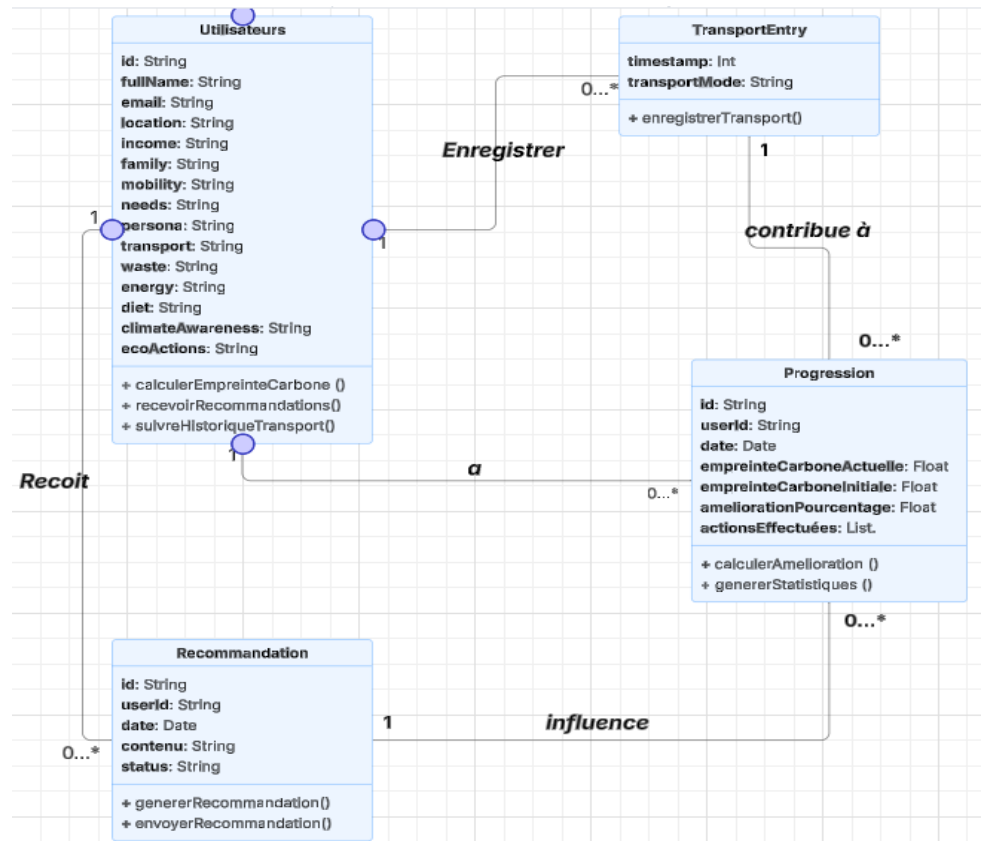


Figure 9 : Le diagramme de classe ci-dessus illustre l'architecture fondamentale de l'application, en mettant en évidence les entités clés ainsi que leurs interactions et dépendances.

Diagramme de Séquence du système.

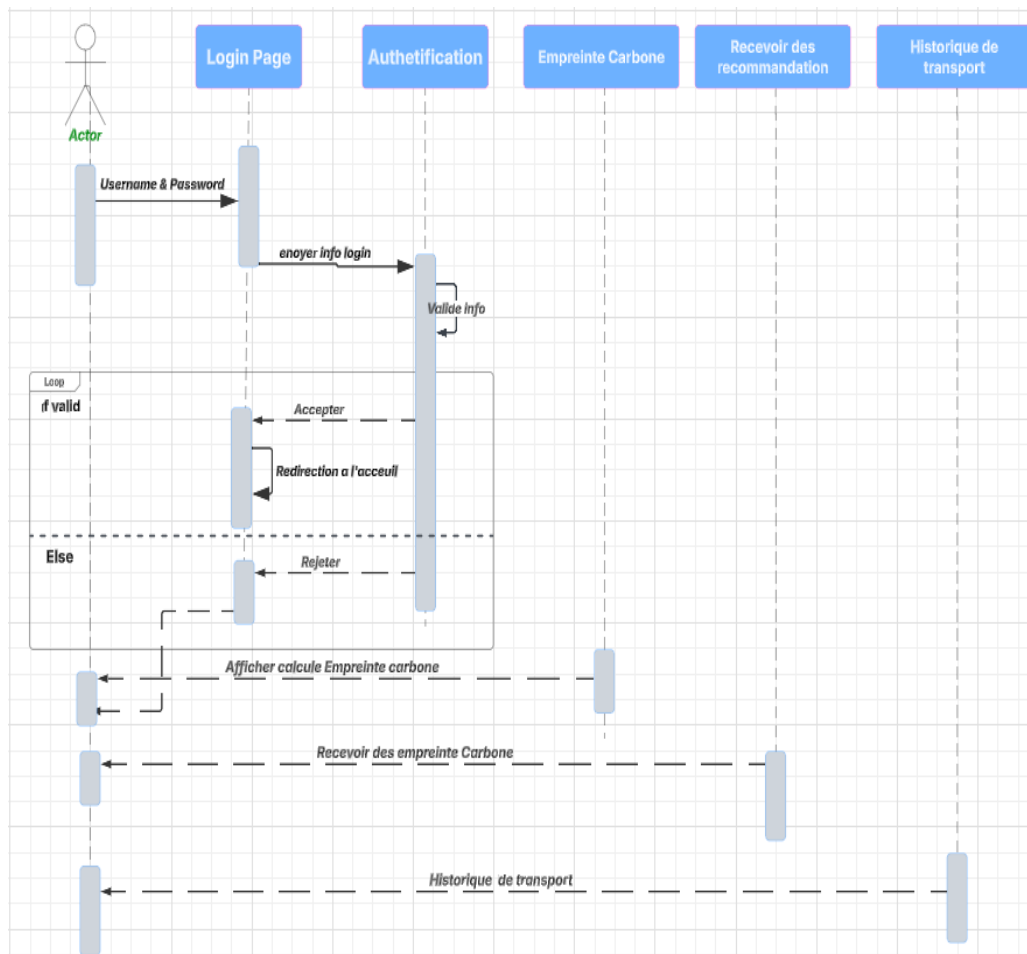


Figure 10 : Les diagrammes de séquences permettent de décrire comment les éléments du système interagissent entre eux et avec les acteurs

5.6 INTERFACE DE L'APPLICATION.

Les interfaces de l'application ont été conçues en suivant les principes d'ergonomie mobile, en mettant l'accent sur la simplicité, la lisibilité et l'accessibilité. Voici un aperçu des écrans principaux :

Connexion utilisateur et page de création de compte.

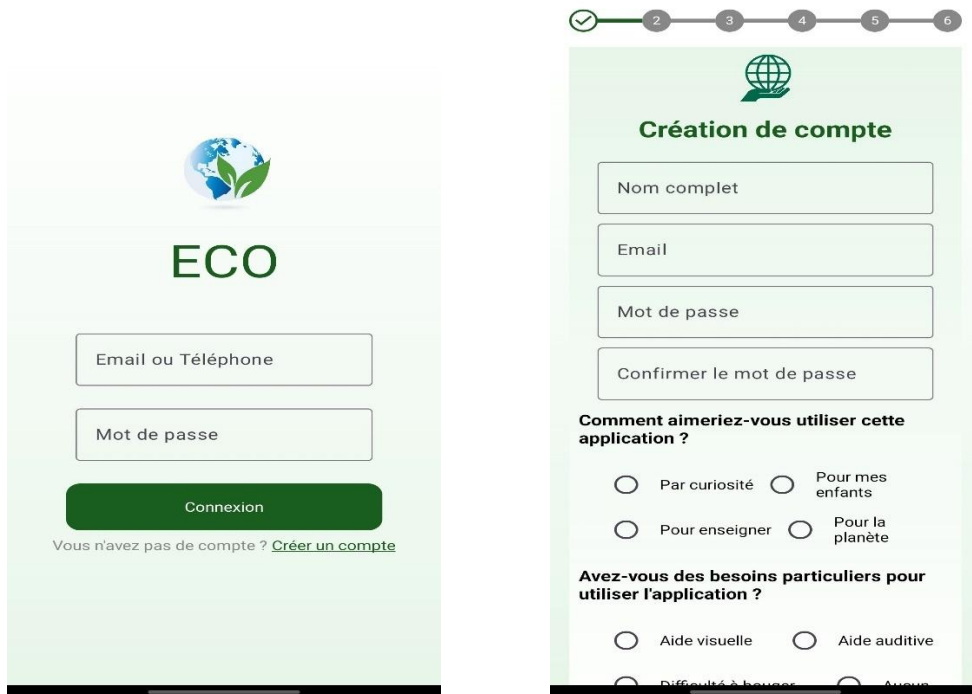


Figure 11 : Capture d'écran de l'application

Ecran d'accueil.

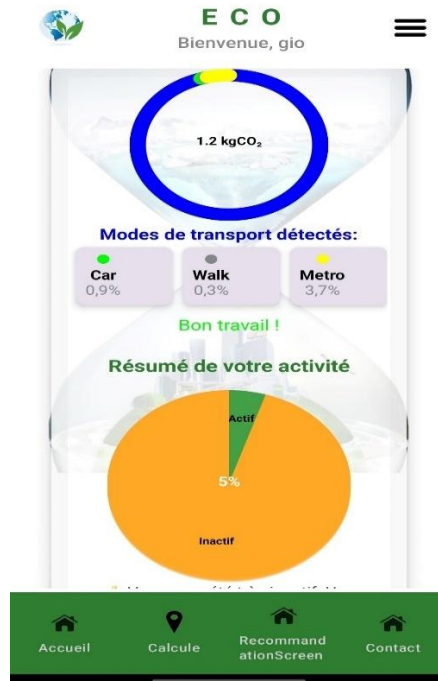


Figure 12 : Capture d'écran de l'accueil de l'application

Tableau d'historique des transports et mode de transport détecté.



Figure 13 : Capture d'écran de l'analyse de transport de l'application.

Interface de recommandation personnalisée.



Figure 14 : Capture d'écran des recommandations de l'application.

5.7 INSTRUMENTATION ET COLLECTE DES DONNÉES.

Afin d'évaluer rigoureusement les effets de l'application, une instrumentation minimale est intégrée :

- **Télémétrie in-app (anonymisée/pseudonymisée)** : événements (connexion, ouverture d'écran, clic sur recommandation, acceptation/refus, participation à un défi), propriétés (mode de transport détecté, distance estimée, durée du trajet), horodatage.
- **Journal mobilité** : séries temporelles locales (sur l'appareil) des TransportEntry (mode détecté, timestamp, distance).
- **Questionnaires intégrés (pré / post)** : connaissances climat, attitudes pro-environnement, intention d'agir, auto-efficacité ; échelle de Likert 1–5.
- **Mesures techniques** : exactitude de la détection de mode (précision, rappel, F1, matrice de confusion) sur un sous-échantillon annoté.
- **Conformité et éthique** : consentement éclairé, retrait à tout moment, minimisation des données, stockage chiffré ; seules des données nécessaires sont collectées.

5.8 PLAN DE VALIDATION TECHNIQUE.

- **Détection du mode de transport (IA)** : La détection du mode de transport, basée sur les capteurs (accéléromètre, gyroscope, GPS, Wi-Fi/cellulaire) est évaluée sur un jeu de données tenues à partir d'indicateurs : accuracy, precision, recall, F1 par classe (marche, vélo, bus, auto, inactif). (Powers, 2011)

• **Calcul d'émissions :**

$$CO_{2e_trajet} = \sum distance_m \times f_m$$

f_m = Facteur d'émission (gCO_{2e}/km) quantité moyenne de gaz à effet de serre émise par kilomètre pour un mode de transport m.

Thermiques (voiture, moto, bus diesel):

$$f_m [g/km] = 10 \times CO_{2e_L} [kg/L] \times C [L/100 km]$$

$$f_{m,pkm} [g/pkm] = f_m [g/km] / occupation$$

Justification : les émissions de combustion mobile se calculent comme « consommation de carburant × facteur d'émission du carburant ». Le facteur par litre (CO₂, CH₄, N₂O en kg/L) provient des tables officielles. Le coefficient 10 provient de la conversion kg→g (×1000) et de la base 100 km (÷100) (Canada(ECCC), 2024).

Électriques (VE, tram, métro, train électrique) :

$$f_m [g/km] = I [g/kWh] \times E [kWh/km]$$

$$f_{m,pkm} [g/pkm] = f_m [g/km] / occupation$$

Justification : les émissions liées à l'électricité se calculent via l'intensité carbone du réseau électrique (gCO_{2e}/kWh) multipliée par la consommation d'électricité (kWh) (Canada(ECCC), 2024).

Transports collectifs (bus, train, métro) :

Si un facteur officiel en gCO_{2e}/pkm existe, l'utiliser. Sinon calculer f_m en g/km puis diviser par l'occupation.

Modes actifs (marche, vélo) :

En périmètre échappement (TTW), $f_m \approx 0$ g/km.

TTW (Tank-to-Wheel, périmètre « échappement ») : émissions directes à l’usage du véhicule (ce qui sort du pot d’échappement). Pour les véhicules électriques, il n’y a pas d’échappement, donc émissions TTW ≈ 0 (HUSS & P, 2020).

- **Distance** : calcul à partir des traces GPS (filtrage des points aberrants, vitesses plausibles par mode, fusion de segments courts).
- **Stabilité / robustesse** : tests hors-ligne (pannes réseau), tolérance aux capteurs désactivés, consommation batterie.

5.9 METHODOLOGIE D’EVALUATION DES IMPACTS.

Questions/Hypothèses :

- **H1 – Impact carbone** : l’usage de l’application réduit les émissions liées aux déplacements des utilisateurs.
- **H2 – Comportements** : hausse de la part de modes soutenables (marche, vélo, transport collectif, covoiturage).
- **H3 – Connaissances/attitudes** : amélioration des scores.
- **H4 – Engagement** : davantage de recommandations acceptées et de défis complétés.

5.9.1 INDICATEURS OPÉRATIONNELS

- **Émissions hebdomadaires par utilisateur (kgCO_{2e}/semaine)** :

$$CO_{2e_{u,w}} = \sum_k (\text{distance}_{u,w,k} \times EF_k)$$

Le $\Delta CO_{2e\%}$ mesure l’évolution (en %) entre une période de référence et une période après intervention :

$$\Delta CO_{2e\%} = ((CO_{2e_{base}} - CO_{2e_{post}}) / CO_{2e_{base}}) \times 100$$

Définitions des termes :

- **u** : l’utilisateur.

- **w** : la semaine considérée.
- **k** : le mode de transport (marche, vélo, bus, voiture, etc.).
- **distance_{u,w,k}** : distance totale parcourue cette semaine en mode k (km).
- **EF_k** : facteur d'émission du mode k (g CO_{2e} / km), issu d'une base reconnue (ADEME/Base Carbone, ECCC/Transports Canada).
- **CO_{2e}_base** : ta valeur **avant** l'intervention (période de référence : ex. moyenne hebdo des 2–4 semaines de base).
- **CO_{2e}_post** : ta valeur **après** l'intervention (ex. moyenne hebdo des semaines avec l'app).
- **Δ (delta)** : le **changement relatif** en pourcentage.

EF_k (gCO_{2e}/km) issus d'une base reconnue (ADEME/Base Carbone ou ECCC/Transports Canada).

- **Part modale soutenable (%)** : somme des distances
marche+vélo+TC+covoiturage+e-mobilité / distance totale.

Le chapitre 5 a établi la faisabilité technique et l'opérationnalité de la solution. Il a précisé l'architecture (MVVM), le découpage modulaire et les modèles UML, présenté les interfaces clés et le tableau de bord, et formalisé les politiques d'usage responsable. Il a également défini l'instrumentation de mesure (télémétrie, journal de mobilité, questionnaires) ainsi que le protocole de validation (détection de mode, calcul des émissions, tests de robustesse). Cet ensemble constitue un cadre méthodologique cohérent et vérifiable pour l'évaluation objective des effets de l'application. S'appuyant sur ce dispositif, le chapitre 6 présentera les résultats.

CHAPITRE 6

SOMMAIRE DES IMPACTS.

Ce chapitre présente les résultats et, surtout, la méthodologie d'évaluation des impacts de l'application. Il répond aux hypothèses posées en 5.9 : H1 (impact carbone), H2 (part modale soutenable), H3 (connaissances/attitudes) et H4 (engagement).

6.1 IMPACTS OPERATIONNELS

Grâce à l'application l'impact opérationnel fait référence au dérèglement et améliorations apportés aux opérations quotidiennes.

- **Reduction des émissions :** L'application pourrait indirectement contribuer à une baisse des émissions globales de CO₂. En guidant les utilisateurs vers des actions concrètes pour réduire leur empreinte carbone.
- **Amélioration de l'accessibilité à l'information :** l'application permettra aux utilisateurs d'accéder facilement à des informations sur les dérèglements climatiques et des actions à entreprendre, rendant ces connaissances plus accessibles.
- **Automatisation des processus :** Grâce aux notifications régulières et des rappels, les utilisateurs seront encouragés à adopter des comportements écoresponsables sans qu'une intervention manuelle ne soit nécessaire.

6.2 IMPACTS ORGANISATIONNELS

Ces impacts concernent l'effet de l'application sur les structures éducatives, communautaires et professionnelles.

- **Mobilisation des communautés éducatives :** Les écoles et les enseignants disposeront de nouvelles ressources pour sensibiliser les étudiants aux pratiques durables.
- **Evolution des comportements :** L'impact organisationnel inclut également le changement de comportement des utilisateurs. Grâce aux ressources éducatives, les utilisateurs adopteront des actions écologiques de manière durable, à la maison et dans leurs communautés.

6.3 IMPACTS DURANT LE DEVELOPPEMENT

6.3.1 IMPACT SUR LES UTILISATEURS ET LES COMPORTEMENTS.

- **Sensibilisation :** L'application peut commencer à influencer les comportements des utilisateurs en augmentant leur sensibilisation aux enjeux environnementaux.
- **Education :** La partie éducative de l'application vise à rendre les utilisateurs plus conscients des actions qu'ils peuvent adopter pour réduire leur empreinte carbone, favorisant des changements de comportement à long terme.
- **Suivi des comportements :** Les notifications et les rappels réguliers encouragent un engagement soutenu, influençant positivement les habitudes des utilisateurs dans leurs actions quotidiennes.

6.3.2 IMPACTS TECHNIQUES ET DE DEVELOPPEMENT DURABLE.

- **Optimisation des ressources :** Le système intègre des pratiques de programmation optimisées pour minimiser la consommation de ressources.
- **Conformité aux normes de développement durable :** Le code du système est conçu pour être maintenable et modulaire, afin de limiter les besoins en ressources pour les mises à jour futures.

6.3.3 IMPACT SOCIAL ET ACCES EQUITABLE.

- **Accessibilités :** L'application est pensée pour être compatible avec une large gamme d'appareils Android, y compris ceux à faible coût et faible consommation d'énergie.
- **Protection des données :** Le système respecte la vie privée et des politiques de données personnelles qui permettent de protéger les utilisateurs.

6.4 SOMMAIRE DES AMELIORATIONS

Pour assurer la pérennité et maximiser l'efficacité de l'application dans le temps plusieurs pistes d'amélioration peuvent être envisagées. Ces suggestions visent à enrichir l'expérience utilisateur, renforcer l'impact de l'application et élargir son audience. Amélioration de l'expérience utilisateur.

6.4.1 AMELIORATION DE L'EXPERIENCE UTILISATEUR (UX).

Des mises à jour régulières pourraient être mises en place pour optimiser l'interface utilisateur, en fonction des retours des utilisateurs, et améliorer l'accessibilité de l'application pour différents groupes d'âges et niveaux de compétences numériques.

6.4.2 INTEGRATION DE NOUVELLES FONCTIONNALITES.

En fonction des besoins émergents et des avancées technologiques, des fonctionnalités supplémentaires peuvent être envisagées, comme l'intégration de jeux éducatifs pour enfants, des défis écologiques pour encourager la participation, ou des modules de suivi de la progression.

6.4.3 ELARGISSEMENT DE LA BASE DE DONNEES DES RECOMMANDATIONS.

La base de données des recommandations pourrait être enrichie pour offrir des suggestions encore plus personnalisées et adaptées aux spécificités locales, par exemple, en intégrant des conseils spécifiques aux régions géographiques des utilisateurs.

6.5 INCONVENIENTS ET LIMITES

Bien que l'application présente de nombreux avantages, certaines limites peuvent freiner son impact potentiel :

6.5.1 LIMITES EN MATIERE DE COLLECTE DE DONNEES PRECISES.

La collecte de données précises sur les habitudes et comportements individuels dépend de la coopération sur leurs appareils. De plus certaines estimations, comme l'empreinte carbone liée aux déchets, peuvent manquer de précision.

6.5.2 DEPENDANCE A LA TECHNOLOGIE DE GEOLOCALISATION.

L'efficacité de certaines fonctionnalités, comme les recommandations personnalisées et le calcul de l'empreinte carbone des déplacements, repose sur la géolocalisation. Cela peut poser des problèmes sur les utilisateurs dans des zones à faible connectivité ou qui préfèrent désactiver le suivi de localisation pour des raisons de confidentialités.

6.5.3 ADOPTION ET RETENTION DES UTILISATEURS.

La difficulté d'inciter les utilisateurs à l'installer et à conserver l'application à long terme est une limite. Maintenir leur engagement nécessitera des fonctionnalités stimulantes et des mises à jour fréquentes pour éviter l'ennui des utilisateurs.

6.6 LA FAISABILITE ET LES RISQUES TECHNOLOGIQUES.

La réalisation de l'application et son développement à long terme présentent plusieurs défis techniques et technologiques :

6.6.1 COMPLEXITE TECHNOLOGIQUE

Intégrer des fonctionnalités avancées, comme le machine Learning pour la reconnaissance d'activités ou la personnalisation en temps réel, peut s'avérer complexe et nécessite des ressources techniques importantes. La faisabilité de ces fonctionnalités dépendra des compétences de développement et des capacités des appareils utilisateurs.

6.6.2 RISQUES DE SECURITE ET DE CONFIDENTIALITE.

La collecte et le stockage de données sensibles (comme les habitudes de transport) posent des défis en matière de sécurité et de conformité aux réglementations aux la protection des données. Des mesures strictes de chiffrement et de gestion de la confidentialité doivent être mises en place pour garantir la sécurité des informations.

6.7 MÉTHODOLOGIE D'ÉVALUATION DES IMPACTS.

Cette section explicite le protocole de mesure des impacts : fenêtres d'observation pré/post, chaîne de calcul du capteur à l'indicateur, formules d'agrégation (CO₂ et parts modales), tests statistiques, analyses de sensibilité et traçabilité des facteurs d'émission.

1) Fenêtres d'observation - Rôle et importance

Pour évaluer l'impact de l'application de façon fiable, nous comparons deux périodes bien définies : une période « pré » (référence) et une période « post » (après usage). Ce cadrage temporel lisse les variations quotidiennes, réduit l'influence d'événements

ponctuels et garantit des résultats comparables et reproductibles. Un seuil minimal de données valides par semaine est appliqué afin d'éviter les biais liés aux semaines incomplètes.

- Pré (base) : moyenne des 2–4 semaines avant usage.
- Post : moyenne des N semaines d'usage (indiquer N).
- Inclusion : utilisateur compté s'il a ≥ 4 jours de données valides/semaine.

2) Pipeline de calcul (capteurs → indicateurs).

Le pipeline transforme des signaux capteurs bruts en indicateurs interprétables et comparables. Il garantit la traçabilité, réduit le bruit (GPS, variations ponctuelles) et normalise les étapes pour obtenir des mesures cohérentes et reproductibles.

Capteurs (accéléro/gyro/GPS/Wi-Fi) → détection des modes → nettoyage GPS (vitesses plausibles, fusion segments < 3 min) → distance par mode → facteurs d'émission (EF) → indicateurs.

3) Règles pour les facteurs d'émission (EF)

Les EF assurent que le calcul des émissions repose sur des valeurs traçables, cohérentes et comparables entre modes. Des règles simples évitent les biais (mauvais périmètre, mauvaise unité, années mélangées).

- Même périmètre pour tous les modes : TTW.
- Unité : gCO₂e/km (véhicule-km) ou gCO₂e/pkm (passager-km).
- Occupation : à préciser si pkm.

4) Indicateurs & formules (H1–H4)

Ces indicateurs transforment les données en métriques décisionnelles alignées sur les hypothèses (H1–H4). Ils permettent des comparaisons pré/post fiables, à condition de garder des unités et périmètres cohérents.

- **H1** – CO₂e hebdomadaire (kg/utilisateur) : $CO_{2e_u,w} = \sum_k (distance_{u,w,k} \times EF_k) / 1000$.

Variation pré→post : $\Delta CO_{2e}\% = ((CO_{2e_base} - CO_{2e_post}) / CO_{2e_base}) \times 100$.

- **H2** – Part modale soutenable (%) = (km marche+vélo+TC+covoiturage+e-mobilité) / km totaux × 100.

- **H3** – Connaissances/attitudes : $\Delta \text{score} = \text{Post} - \text{Pré}$ (par thème).

- **H4** – Engagement : taux d’acceptation = acceptées/(acceptées+refusées) ;

5) Tests statistiques (pré/post appariés).

L’objectif des tests statistiques est de vérifier si les écarts observés entre la période Pré (base) et Post (usage) sont réels et non dus au hasard, en comparant les mêmes utilisateurs mesurés deux fois. Pour les variables continues (CO₂e/semaine, part modale en %, scores Likert agrégés), on teste d’abord si la différence Post–Pré est à peu près normale : si oui, on utilise le t apparié ; sinon, le Wilcoxon apparié. Pour les proportions appariées (ex. rétention oui/non), on emploie le test de McNemar. On ne garde que les semaines « valides » (ex. ≥ 4 jours de données) afin d’éviter les biais liés aux données manquantes (Biometrics, 1945) (McNemar, 1947).

6) Seuils de succès (à définir avant analyse)

- H1 : $\Delta CO_{2e}\% \leq -10 \%$.
- H2 : +5 points de part soutenable.
- H3 : +0,3 point Likert.

- H4 : rétention ≥ 40 % à W semaines.

Ce chapitre a montré que l'application peut générer des effets opérationnels, organisationnels et sociaux positifs, tout en explicitant une méthode de mesure rigoureuse et reproductible. En nous appuyant sur des fenêtres pré/post, une chaîne de calcul capteurs → indicateurs, des facteurs d'émission traçables (périmètre constant) et des tests statistiques appariés (t/Wilcoxon, McNemar), nous disposons d'un cadre robuste pour évaluer les hypothèses H1–H4 : réduction des CO₂e, hausse de la part modale soutenable, amélioration des connaissances/attitudes et engagement mesurable. Les seuils de succès fixés (Δ CO₂e%, points de part modale, Δ Likert, rétention) permettent de conclure de manière objective. Les limites identifiées (qualité GPS/capteurs, dépendance à la géolocalisation, rétention) sont prises en compte par des analyses de sensibilité et guident les améliorations (UX, fonctionnalités, base de recommandations). Ce dispositif méthodologique aligne la démonstration d'impact avec les exigences du jury et prépare le terrain pour la présentation des résultats chiffrés.

CONCLUSION

Ce mémoire s'inscrit dans une démarche de recherche orientée vers la résolution d'un enjeu mondial : le dérèglement climatique. La problématique retenue porte sur la sensibilisation individuelle au moyen d'une technologie accessible à tous : le téléphone mobile. À partir d'un cadre théorique centré sur les sciences comportementales et l'éducation environnementale, nous avons conçu une application mobile éducative appelée ECO, destinée à mesurer l'empreinte carbone des utilisateurs.

La méthodologie a suivi une logique itérative combinant des approches qualitatives (analyse des personas, définition des besoins, évaluation de l'expérience utilisateur) et quantitatives (analyse de données, intégration de l'intelligence artificielle). L'architecture du système a été pensée selon les principes de modularité, de maintenabilité et de sécurité, avec un back-end sur Firebase/Firestore, une interface en Jetpack Compose et un moteur de recommandations reposant sur des modèles pré-entraînés (Tensorflow Lite).

Les résultats obtenus lors du développement montrent que l'application ECO permet aux utilisateurs de prendre conscience de leur empreinte écologique et d'adopter un comportement plus durable, notamment grâce au calcul automatique de leur empreinte carbone à partir des données de déplacement. Le tableau de bord écologique personnalisé donne aux utilisateurs un retour visuel immédiat sur leur comportement, tandis que les recommandations personnalisées favorisent une transition progressive au fil du temps vers des habitudes plus durables.

Parmi les modules les plus appréciés de l'application ECO figure la fonction de visualisation des données des modes de transport, incluant des graphiques interactifs, des rappels écologiques et un suivi de progression basé sur l'engagement. L'aspect éducatif a

également été souligné comme un élément clé de l'application, permettant une compréhension simplifiée des enjeux liés au dérèglement climatique.

La présente étude apporte une contribution concrète à la recherche en technologie éducative et en informatique environnementale. Elle montre qu'il est possible de combiner la personnalisation, l'intelligence artificielle et l'éducation environnementale dans une même solution accessible. L'approche centrée sur l'utilisateur a permis de rendre le produit non seulement fonctionnel, mais aussi pertinent dans sa mission de sensibilisation. Sur le plan pratique, l'application ECO peut être intégrée dans des projets éducatifs nationaux ou locaux, utilisée dans des établissements scolaires comme support pédagogique, ou encore servir d'outil de sensibilisation dans des campagnes publiques afin d'encourager des comportements plus durables face au dérèglement climatique. La méthodologie adoptée pourrait aussi être répliquée pour d'autres thématiques sociales ou environnementales.

Malgré ces avantages, notre étude comporte certaines limites. Elle repose sur un prototype (ECO) dans un contexte très contrôlé, avec un nombre limité de test de paramétrage. De plus, la diversité culturelle et technologique des utilisateurs finaux pourrait influencer leur engagement et la précision des données collectées. Par ailleurs, certaines fonctionnalités critiques, notamment la reconnaissance d'activités ou la précision géographique, peuvent varier fortement selon le matériel utilisé comme (modèle de téléphone) et les permissions activées.

En somme, cette recherche démontre que les technologies mobiles éducatives, lorsqu'elles sont bien conçues et intégrées dans une stratégie centrée sur l'utilisateur, peuvent jouer un rôle fondamental dans la transition écologique chez les utilisateurs. En permettant aux citoyens de mieux comprendre leur impact environnemental, de suivre leur progression via un tableau de bord et de recevoir des recommandations adaptées, l'application ECO agit

comme un catalyseur de changement. Elle montre qu'une démarche technologique peut dépasser le simple aspect utilitaire pour devenir un levier d'engagement, de responsabilisation et d'apprentissage. En mobilisant l'intelligence artificielle, la géolocalisation, la psychologie comportementale et les principes du design UX, cette solution allie rigueur scientifique, pertinence sociale et innovation technologique.

Ce mémoire constitue ainsi une base solide pour le développement futur d'un outil éducatif numérique dédié à la sensibilisation climatique. Il illustre le potentiel de l'informatique au service de l'environnement et appelle à poursuivre l'exploration de ces synergies pour construire une société plus consciente, plus résiliente et plus durable.

LISTE DE RÉFÉRENCES

- (IPCC), I. P. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge. Récupéré sur <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>
- (IPCC), I. P. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Summary for Policymakers*. Geneva. Récupéré sur <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>
- (OMM), O. m. (2023). *Climate change indicators reached record levels in 2023*. Récupéré sur <https://wmo.int/news/media-centre/climate-change-indicators-reached-record-levels-2023-wmo>
- (UNEP), U. N. (2025). *Frontiers 2025: The Weight of Time – Facing a New Age of Challenges for People and Ecosystems*. Récupéré sur <https://www.unep.org/resources/frontiers-2025-weight-time>
- Aditya, U. (2025, Mars). Understanding Jetpack Compose: Building Superior Android Apps. *International Journal of Advanced Research in Science Communication and Technology*. doi:10.48175/IJAR SCT-24471
- Ahmed, A., & Mawada, A. (2025). Evaluation of Personal Ecological Footprints for Climate Change Mitigation and Adaptation: A Case Study in the UK. *Sustainability*. doi: <https://doi.org/10.3390/su17125415>
- Ajzen. (1991). La théorie du comportement planifié. *Accompagner le changement des personnes*, 1-3.
- Ajzen, I. (1991). The Theory of Planned Behavior. 50(2), 179–211. doi:10.1016/0749-5978(91)90020-T
- Alex Latulipe, L. (2021, Aout 14). L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES UNIVERSITES. *Analyse et recommandations*, pp. 30-35.
- Alexander, J. v., & Jan, A. v. (2013, June 7). The digital divide shifts to differences in usage. *SAGE Journal*, 16. doi:<https://doi.org/10.1177/1461444813487959>
- Alison, A. (2024, Novembre). Climate change and sustainability literacy: a mixed-methods study of attitudes to climate education in secondary schools. *Climate change*. doi:10.1007/s10584-024-03815-1
- Almustapha, A. W., Lawan, N., & Maryam, I. M. (2020, May). ICT Innovations for Climate Change Communication and Public Awareness. 8, 1912-1916. doi:10.22214/ijraset.2020.5310
- Andersson, D., Nässén, J., & al., e. (2020). A novel approach to calculate individuals' carbon footprints using financial transaction data and EE-MRIO. (256). doi:10.1016/j.jclepro.2020.120396
- Biometrics, B. (1945). Individual comparisons by ranking methods. 80–83.

- Biørn-Hansen, A., Katzeff, C., & Eriksson, E. (2022). Exploring the Use of a Carbon Footprint Calculator Challenging Everyday Habits. *ACM*, 1-10. doi:10.1145/3546155.3546668
- Biskaborn, B. K., Smith, S. L., Noetzli, J., & al., e. (2019). Permafrost is warming at a global scale. *Nature Communications*, 10, 264. doi:10.1038/s41467-018-08240-4
- C., M., & C., D. (2017, Decembre 05). Sensibilisation à l'adaptation au changement climatique par. *Sensibilisation à l'adaptation au changement climatique grâce aux applications mobiles*, 2(7). doi: 10.15406/mojes.2017.02.00050
- Canada(ECCC), E. a. (2024). Emission Factors and reference values. 2-16. doi:10.25318/1610001701-eng
- Carlie, D. T., Stephanie, L., & Jessica, R. (2023, Feb 13). Justice in climate change education: a systematic review. *Environmental Education Research*, 29. doi:https://doi.org/10.1080/13504622.2023.2181265
- Céline, B. (2004). LA RÉSISTANCE AU CHANGEMENT : SYNTHÈSE ET. *HEC Montréal*, 4-10.
- Chen, Y., & Liu, B. (2014, June 26). Quantitatively evaluating the effects of CO2 emission on temperature rise. *Quaternary International*, 336, 171-175. doi:https://doi.org/10.1016/j.quaint.2013.11.031
- Claire, A., Gilbert, C., Valérie, C., Lecat, R., & Sophie, B. (2024, Mai 15). Comment la technologie peut-elle contribuer à limiter le changement climatique ? *AMSE*.
- Clemente, P. e. (2009). Le modèle transthéorique. *Accompagner le changement des personnes Psychologie sociale*, 1-3.
- Codispoti, C. (s.d.). *Commentaire sur « Klima » (page de lancement)*. Récupéré sur Product Hun: <https://www.producthunt.com/products/klima/launches/klima?comment=1206928>
- Daue, M. (2024). *Développement d'un calculateur d'empreinte carbone pour les élèves du secondaire*.
- Dominika, K., Stephan, U. D., Martin, W., & Falko, S. (2016). Theoretical explanations for maintenance of behaviour change: a systematic review of behaviour theories. 10, 277-296. doi:http://dx.doi.org/10.1080/17437199.2016.1151372
- Doney, S. C., Fabry, V. J., Feely, R. A., & Kleypas, J. A. (s.d.). Ocean acidification: The other CO₂ problem. *Annual Review of Marine Science*, 1, 169-192. doi:10.1146/annurev.marine.010908.163834
- Dunlap, R. E. (2000). Measuring endorsement of the New Ecological Paradigm. *A revised NEP scale. Journal of Social Issues*, 425-442.
- Emad, S., Meiyappan, N., & Ahmed, E. H. (2024, March 10). What Do Mobile App Users Complain About? *IEEE Software*, 70 - 77. doi:10.1109/MS.2014.50
- Evelyn, F.-B. (2020). *Trajectoires de « militants » écologistes au Québec*. Quebec: HEC Montreal.
- Florence, M., & Benoît, L. (2012). Mobilité urbaine et technologies de l'information et de la communication (TIC) : enjeux et perspectives pour le climat.

- Florian, B., Carmen, M., & Sven, M. (2023, Mars 22). Leveraging Mobile Sensing Technology for Societal Change Towards more Sustainable Behavior. doi:<https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.12426>
- Flynn, C. (2023, avril 17). Guide pratique sur le changement climatique. *Le dictionnaire du climat*, 67.
- Fojtik, R. (2014). Mobile Technologies Education. *Mobile Technologies Education*, 342 – 346.
- Fojtik, R. (2014). Mobile Technologies Education.
- Future, L. f., & LSF. (2016). Climate Change Resources. 3-10.
- GAUTHIER, J.-S. (2024). *PORTRAIT DE L'ÉCOANXIÉTÉ, DE LA CURIOSITÉ ET DE L'ENGAGEMENT*.
- Ghislain, S., Geneviève, D.-T., Benoit, D., Charles-Hugo, M., & Audrey, D. (2022). Quand le programme Carbone Scol'ERE contribue à l'éducation relative au changement climatique et au développement de la jeunesse engagée. 17-2. doi:<https://doi.org/10.4000/ere.8984>
- Günther, S. A., Staake, T., Schöb, S., & Tiefenbeck, V. (2020). The behavioral response to a corporate carbon offset program: A field experiment. *Global Environmental Change*, 64. doi:10.1016/j.gloenvcha.2020.102123
- Hannah, R., & Max, R. (2024, January). How much CO₂ does the world emit? Which countries emit the most? *CO₂ emissions*.
- Henri, B. (2020). *Document professionnel ou Guide institutionnel*.
- HUSS, A., & P, W. (2020, 09 23). JEC Tank-to-Wheel report v5: Passenger cars. *European Commission*. doi:10.2760/557004
- IPCC. (2018). *Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change*. Récupéré sur <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- IPCC, I. P. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Geneva. Récupéré sur <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Joni, S., Kathleen, W. G., Soon-Gyo, J., & Bernard, J. J. (2022, April 29). Use Cases for Design Personas: A Systematic Review and New. *Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1-21. doi:<https://doi.org/10.1145/3491102.351758>
- Lene, N. (2024). *The Encyclopedia of Human-Computer Interaction, 2nd Ed*. INTERACTION DESIGN FOUNDATION.
- Marie-Guyart. (2024). *Directive pour la réalisation*. Gouvernement du Québec – Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs.
- Märkisch, L. (s.d.). *Product Hunt*. Récupéré sur Commentaire sur « Klima » (page de lancement): <https://www.producthunt.com/products/klima/launches/klima?comment=1206928>

- Markus, J. e. (2019). *Luttez contre le changement climatique avec une application puissante*. Récupéré sur klima: <https://klima.com/faq/>
- Matthew, J. H., Emily, A. H., Paul, G. B., & Kelly, S. F. (2016, Février 22). 3. Résistance culturelle et idéologique : dans certaines régions, notamment aux États-Unis et en Australie, une partie de la population continue de remettre en question la réalité ou l'ampleur du changement climatique, ce qui freine l'intégration de ces n. *Nature Climate Change*. doi:Nature Climate Change
- Matthew, s., McKenzie, J. E., & Bossuyt, P. M. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. doi:10.1136/bmj.n71
- Matthew, W. J., Glen, P. P., Thomas, G., Robbie, M. A., & Clemens, S. (2023, March 29). National contributions to climate change due to historical emissions of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide since 1850. *Scientific Data*, 10.
- McNemar, Q. (1947). Note on the sampling error of the difference between correlated proportions or percentages. 153–157.
- Melese, G. M. (2021, septembre 06). Impact of climate change on biodiversity and food security: a global perspective. *Agriculture & Food Security*, 1-14. doi:<https://doi.org/10.1186/s40066-021-00318-5>
- Michie, S., Richardson, M., Johnston, M., Abraham, C., Francis, J., Hardeman, W., & al., e. (2013). The Behavior Change Technique Taxonomy (v1) of 93 Hierarchically Clustered Techniques. (46), 81–95. doi:10.1007/s12160-013-9486-6
- Mulrow, J., Machaj, K., Deanes, J., & Derrible, S. (2019). The state of carbon footprint calculators: An evaluation of calculator design and user interaction feature. 18, 33-40. doi:10.1016/j.spc.2018.12.001
- Nerem, R. S., Beckley, B. D., Fasullo, J. T., Hamlington, B. D., Masters, D., & Mitchum, G. T. (2018). Climate-change–driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 115(9), 2022–2025. doi:<https://doi.org/10.1073/pnas.1717312115>
- Nerem, R. S., Beckley, B. D., Fasullo, J. T., Hamlington, B. D., Masters, D., & Mitchum, G. T. (2018). Climate-change–driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 2022-2025. doi:10.1073/pnas.1717312115
- Nick, W., Markus, A., Nigel, A., Sonja, A.-K., & Krisztina, B. (2018, Decembre). the 2018 report of the Lancet Countdown on health and climate change: shaping the health of nations for centuries to come. *The Lancet*, 2479-2514. doi:[https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)32594-7](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)32594-7)
- North, & Hertfordshire. (2021). *Review of Carbon Footprint Calculators*. Letchworth, UK. Récupéré sur <https://democracy.north-herts.gov.uk/documents/s17833/Carbon%20Footprint%20Calculators%20Review.pdf>
- ONG, W. W. (2006). *How big is your environmental footprint?* Récupéré sur WWF Suisse: <https://footprint.wwf.org.uk/>

- Oriana, M., Andrea, M., Sara, M., Giuliano, V., & Ferdinando, F. (2024). Digital technologies for behavioral change in sustainability domains: a systematic mapping review. *14*. doi: <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1234349>
- Pamela, K. (2011). *Measuring and Valuing Environmental Impacts: A Systematic Review of Existing Methodologies*.
- Patricia, S., Kathryn, B., & Celia, M. (2018, Janvier 4). The health impacts of climate-related migration. *BMC Medicine*. doi:<https://doi.org/10.1186/s12916-017-0981-7>
- Paul, A. Z., & Sean, J. B. (2011, june 07). Positional Accuracy of Assisted GPS Data from High-Sensitivity GPS-enabled Mobile Phones. 381 - 399. doi:<https://doi.org/10.1017/S0373463311000051>
- Perkins-Kirkpatrick, S. E., & Lewis, S. C. (2020). Increasing trends in regional heatwaves. *Nature Communications*, *11*, 3357. doi:10.1038/s41467-020-16970-7
- Powers, D. M. (2011). Evaluation: From Precision, Recall and F-measure to ROC, Informedness, Markedness and Correlation. *Journal of Machine Learning Technologies*, 37-63.
- Richard, S. J. (2018, Janvier 12). The Economic Impacts of Climate Change. *12*, 4-25. doi:<https://doi.org/10.1093/reep/rex027>
- Rikke, F. D., & Teo, Y. S. (2025). Personas – A Simple Introduction.
- Robert, D., Jared, D., & Advait, J. (2021). TENSORFLOW LITE MICRO: EMBEDDED MACHINE LEARNING ON TINYML SYSTEMS. *Proceedings of Machine Learning and Systems*, *3*, 800-811.
- Stoyanov, S. R., Hides, L., Kavanagh, D. J., Zelenko, O., Tjondronegoro, D., & Mani, M. (2015). Mobile App Rating Scale: A New Tool for Assessing the Quality of Health Mobile Apps. *3*(1), e27. doi:10.2196/mhealth.3422
- UNESCO. (2024). Education and climate change: Learning to act for people and planet. *Global Education Monitoring Report – Education at the COP*. doi:10.54675/HYHQ6094
- Unies, N. (2015). Changement Climatiques. *Paix, dignité et égalité sur une planète saine (United Nations)*.
- Veronika, W., Johanna, K., & Andrea, M. (2022). Climate Change Education Challenges from Two Different Perspectives of Change Agents: Perceptions of School Students and Pre-Service Teachers. doi:10.3390/su14106081

