



Acronym / Acronyme	LAVEC		
Titre du projet en français	<i>LA Ville En Chemins</i>		
Titre du projet en anglais	<i>Paths in the city</i>		
Keywords/Mots-clefs (min 5-max 10)	Changement climatique ; villes sobres et frugales; modélisation et simulation; décarbonation; atténuation; inclusion; construction; ingénierie; rénovation, passage à l'échelle		
Leading institution /Établissement porteur	Centre National de la Recherche Scientifique		
Défi principal choisi :	<input checked="" type="checkbox"/> Défi 1 : le changement climatique et la préservation de la biodiversité <input type="checkbox"/> Défi 2 : la ville résiliente <input type="checkbox"/> Défi 3 : la ville sobre et frugal <input type="checkbox"/> Défi 4 : la ville inclusive et équitable <input type="checkbox"/> Défi 5 : la ville durable, santé et bien-être <input type="checkbox"/> Défi 6 : les défis émergents, signaux faibles, nouvelles difficultés		
Autres défis que le défi principal	<input type="checkbox"/> Défi 1 : le changement climatique et la préservation de la biodiversité <input type="checkbox"/> Défi 2 : la ville résiliente <input checked="" type="checkbox"/> Défi 3 : la ville sobre et frugal <input type="checkbox"/> Défi 4 : la ville inclusive et équitable <input type="checkbox"/> Défi 5 : la ville durable, santé et bien-être <input type="checkbox"/> Défi 6 : les défis émergents, signaux faibles, nouvelles difficultés		
Scientific coordinator / Responsable du projet	Last Name, First name, Position / Prénom, Nom, Qualité		
	Carrier, Marion, Chargée de Recherche CNRS Hourdin, Frédéric, Directeur de Recherche CNRS		
	e-mail / Courriel		e-mail / Courriel
	marion.carrier@mines-albi.fr hourdin@lmd.jussieu.fr		
Project duration / Durée du projet	72 Months		
Requested funding / Aide totale demandée	2 381 235 €	Full cost / Coût complet	6 053 273 €



Partner institution(s) involved in the project/Liste des établissements du consortium :

Name of the institutions of higher education and research / Établissements d'enseignement supérieur et de recherche	Activity / Secteur(s) d'activité
<i>IMT Mines Albi</i>	<i>Formation d'ingénieur.e.s généralistes</i>
<i>Université Toulouse 3 Paul Sabatier</i>	<i>Enseignement supérieur : Sciences, santé, sport, technologie et ingénierie</i>
<i>Université Toulouse 2 Jean Jaurès</i>	<i>Enseignement supérieur : Arts, lettres et langues et sciences humaines et sociales</i>
<i>Sorbonne Université</i>	<i>Enseignement supérieur : Lettres, langues et sciences humaines et sociales, des sciences et de l'ingénierie, et de la santé.</i>

Name of the research organisations / Organismes de recherche	Activity / Secteur(s) d'activité
<i>CNRS</i>	<i>Recherche scientifique dans l'ensemble des domaines scientifiques et technologiques</i>
<i>Météo France</i>	<i>Prévisions météorologiques</i>

Autres partenaires	Secteur(s) d'activité
<i>Méso-Star (SCOP)</i>	<i>Opérateur de plateforme Stardis et création de données géométriques complexes</i>
<i>Centre d'Accueil Permanent de Saint-Front</i>	<i>Animation de classes découvertes certifiées par la ligue de l'enseignement</i>

Research units involved in the project/Liste des unités de recherche impliquées :

Indiquer pour chaque unité de recherche le numéro RNSR (Répertoire national des structures de recherche).

Research unit / Unités de recherche	Numéro RNSR¹	Institution / Établissement de tutelle	Noms, prénoms des personnes impliquées par laboratoire	Orcid² ou IdHAL³ des personnes
<i>Rapsodee</i>	201220448D	UMR 5302 / CNRS - IMT Mines Albi	Carrier Marion Eibner Simon El Hafi Mouna	0000-0003-4740-3416 0000-0003-2976-0575 0000-0002-8191-8280
<i>Laboratoire de Météorologie Dynamique</i>	199812867Z	UMR 8539 / CNRS - Sorbonne Université - ENS	Fairhead Laurent Hourdin Frédéric Madeleine Jean Baptiste	0000-0001-7761-3663 0000-0003-2083-8647

¹ Comprenant le numéro d'identifiant national des unités de recherche <https://appliweb.dgri.education.fr/rnsr/>

² <https://info.orcid.org/fr/what-is-my-id/>

³ <https://doc.archives-ouvertes.fr/identifiant-auteur-idhal-cv/>



		- École Polytechnique - ENPC		0000-0003-4393-7103
LAPLACE	200711882P	UMR 5213 / CNRS – INPT - Université Toulouse 3-Paul Sabatier	Blanco Stéphane Fournier Richard	Idref : 747441 Idref : 1174828
CNRM	201320566C	UMR 3589 /	Couvreux Fleur Villefranque Najda	0000-0002-8440-3362 0000-0002-4687-2635
UMR Education, Formation, Travail, Savoirs	201119442P	Université Toulouse Jean Jaurès et École Nationale Supérieure de Formation de l'Enseignement Agricole	Pélessier Lionel Venturini Patrice Lecureux Marie-Hélène Rabier Alain	0000-0002-9054-5527

Institution/Liste des projets liés :

Le cas échéant, listes des projets financés par le France 2030/PIA auxquels ce projet est lié (Labex, etc.)	<i>Acronyme du(des) projet(s), préciser le type de projet</i> MC ² MCMET PEPR TRACCS
Le cas échéant, autres projets auxquels ce projet est lié	<i>Acronyme du(des) projet(s), préciser le type de projet</i>



Résumé du projet en français (Non Confidentiel – 4000 caractères maximum, espaces inclus)

Le projet LAVEC émane d'un collectif de recherche constitué de modélisateurs du climat impliqués fortement dans l'anticipation des changements climatiques et de leurs conséquences, du collectif EDStar qui porte depuis vingt ans le développement d'un cadre théorique, méthodologique et informatique permettant de modéliser des systèmes complexes multi-physiques et multi-échelles dans un formalisme en espaces de chemins hérité de Feynman et Kac, et enfin de didacticiens des sciences, intégrés dans le collectif depuis une dizaine d'années, et qui s'intéressent à la circulation des savoirs liés à l'énergie et au climat. Le projet s'est construit avec le Centre d'Accueil Permanent (CAP) de Saint-Front en Haute-Loire lui-même engagé dans l'éducation populaire sur les questions d'environnement. Le CAP est un lieu de résidence régulier du collectif qui y expérimente des modalités originales de circulation des savoirs en son sein et avec les habitants du territoire. Bénéficiant des avancées de l'informatique graphique, les méthodes en espaces de chemins permettent d'effectuer la simulation thermique dynamique d'un bâtiment ou d'une ville couplée avec la météorologie ou le climat, quelles que soient les échelles temporelles et spatiales, du pont thermique à la ville. Le caractère intuitif de ces méthodes facilite l'appropriation de la physique nécessaire à la compréhension des enjeux de la transition énergétique. Les preuves de concepts ayant été validées par des publications, l'objectif du projet est à présent le passage à l'échelle pour que les citoyens s'approprient la physique et soient acteurs de l'adaptation des villes au changement climatique. Il vise à concevoir, développer et distribuer une suite de logiciels libres (dite "le simulateur"), pour aider à la conception, l'aménagement et la gouvernance des milieux urbains, ainsi qu'à la circulation des savoirs. Du point de vue calculatoire, comme didactique, le simulateur s'adresse à un public large allant d'ingénieurs experts du bâtiment, à des classes de découverte "énergie / climat" au CAP Saint Front. Pour ce faire, la stratégie proposée est de guider sa conception par la nécessité d'en faire "un jeu d'enfants". Cela pose des questions de recherche avec de fortes interactions entre l'informatique, la physique, le climat, et les didactiques de ces disciplines. Le site du CAP Saint Front sera utilisé comme lieu "pilote" pour expérimenter de nouvelles formes de circulation des savoirs avec différents publics. Le projet est structuré en 4 axes : (1) la production de logiciels permettant le passage d'un dessin d'enfant ou d'architecte à une donnée 3D conforme, nécessaire aux calculs thermiques qui seront réalisés avec le logiciel Stardis largement utilisé dans la communauté nationale de thermiciens ; (2) l'instrumentation du bâtiment du CAP pour confronter les mesures au modèle thermique couplé à la météo ou au climat. Les images infrarouges obtenues par les différents publics seront comparées à des images infrarouges simulées avec le modèle thermique afin de l'affiner ; (3) le couplage de la thermique des bâtiments avec le modèle de climat LMDZ et la quantification des incertitudes associées, une question majeure dans la conception de services climatiques. Le dernier axe (4), transverse au projet, vise à concevoir et expérimenter de nouvelles modalités de circulation des savoirs, et de mesurer la capacité de transformation d'un enseignement usant d'outils de simulations à la pointe des recherches climatiques et d'ingénierie énergétique, en contact étroit avec le monde de la recherche. Le projet résonne avec la forte ambition sociétale du PEPR en visant la massification, ici autour de l'utilisation du simulateur et de nouvelles modalités de transmission des savoirs.



**PEPR VBDI
APPEL À PROJETS
2023**

DOCUMENT PRESENTATION PROJET

LAVEC

Résumé du projet en anglais (Non Confidentiel – 4000 caractères maximum, espaces inclus)



Contents

Contents	6
1. Contexte, objectifs et réalisations antérieures	7
1.1. <i>Contexte, objectifs et caractère innovant du projet</i>	7
1.2. <i>Principales réalisations antérieures</i>	8
2. Description détaillée du projet	12
2.1. <i>Description du projet, stratégie scientifique</i>	12
2.2. <i>Présentation scientifique et technique du projet</i>	13
Axe 1 : Du dessin des bâtiments aux calculs thermiques.....	13
Axe 2 : L'instrumentation et la thermique du bâtiment de Cap Saint-Front	14
Axe 3 : La thermique des bâtiments sous un climat changeant	16
Axe 4 : La circulation des savoirs.....	17
2.3. <i>Déroulement, indicateurs et jalons</i>	18
3. Organisation et pilotage du projet	20
3.1. <i>Responsable du projet</i>	20
3.2. <i>Organisation du partenariat</i>	21
3.3. <i>Pilotage</i>	23
3.4. <i>Stratégie des établissements</i>	24
4. Impact et retombées du projet	24
5. Justification des moyens demandés	26
6. Cited references / Références bibliographiques citées	27
7. Linked projects	28
8. CV du responsable du projet	28
Appendix section	30
Annexe Partenariats	36
Publications Appendix	37



1. Contexte, objectifs et réalisations antérieures

1.1. Contexte, objectifs et caractère innovant du projet

Contexte et enjeux : Après l'alerte sur le réchauffement global, l'heure est à penser le futur.

La rénovation thermique des bâtiments et de la ville est une cible privilégiée tant pour la décarbonation que pour l'adaptation. Rendre cette transformation effective nécessite des avancées aussi bien sur les outils de simulation intégrant thermique du bâtiment et climat que sur la circulation des savoirs entre recherche et société. En effet, les choix d'aménagement des villes de demain concernent directement les territoires et leurs citoyens et le constat est largement partagé qu'il est essentiel de les associer à cette transformation. **En Simulation Thermique Dynamique (STD, [Annexe 1 : Liste des acronymes](#)) du bâtiment, les enjeux sont multiples.** La plupart des simulations reposent sur des modèles par zones à température homogène, et la mauvaise prise en compte des ponts thermiques est une source d'erreur particulièrement importante^[1]. Ces simplifications sont un frein pour passer de la simulation thermique d'un bâtiment à toute une ville. Ce passage d'échelle nécessite également de repenser la génération de données géométriques et thermophysiques, tout en restant compatible avec les formats standards 3D actuels. A cela vient s'ajouter la difficulté de déploiement de protocoles expérimentaux en présence ou en absence d'habitants permettant de mesurer la performance énergétique réelle des bâtiments et d'évaluer la pertinence des simulations. Enfin, la variabilité "des données météorologiques [sont] nécessaires à la [STD]"^[2] est rarement prise en compte pour prévoir la consommation d'un bâtiment ou la surchauffe estivale et les choix de rénovation énergétique se font souvent sur la base de données passées et non sur le climat futur même si la situation commence à changer^[3]. **Pour les physiciens du climat, lanceurs de l'alerte sur le réchauffement global dans les années 1980, l'enjeu est de construire des "services climatiques"** avec et pour les citoyens et les collectivités. C'est l'objectif du PEPR TRACCS (TRAnformer la modélisation du Climat pour les services Climatiques) qui regroupe les deux pôles de modélisation du climat en France : l'IPSL à Paris et Météo France à Toulouse. Ces services reposent sur des simulations globales du climat passé, présent et futur aujourd'hui orchestrées dans le cadre des *Coupled Model Intercomparison Projects* (CMIP) organisés en amont des rapports du GIEC. Ces simulations peuvent ensuite être raffinées localement (descente d'échelle dynamique), comme dans le projet Cordex notamment^[4]. Les simulations CMIP et CORDEX sont réalisées selon un protocole strict et mises à disposition dans des formats standardisés. Ceci permet d'estimer une part de l'incertitude liée aux différents choix de modélisation (dite épistémique ou structurelle, notamment celle associée à la représentation des nuages) faits par la trentaine de centres participants. En pratique cependant, les utilisateurs ont souvent à faire un choix de quelques simulations qu'ils utilisent en entrée d'un modèle de production agricole, de débit d'un bassin, de thermique du bâtiment... La quantification de la "cascade d'incertitudes", depuis les simulations climatiques globales, la descente d'échelle, puis la réalisation de calculs d'impact, reste un enjeu majeur des services climatiques. **La circulation des savoirs entre la recherche et la société est une autre source de difficultés** du fait d'un accès limité aux outils (pas toujours sous licences libres), de difficultés d'appropriation de la physique en jeu dans les calculs énergétiques et de la complexité des questions climatiques. Sur des terrains aussi complexes, la recherche et l'expertise passent nécessairement par la simulation numérique. Or, elle est absente de l'enseignement scientifique en France jusqu'au lycée, et très peu présente dans les premières années post-bac. Pourtant, l'enseignement a pour rôle de transmettre non seulement des savoirs mais aussi des méthodes canoniques pour attaquer des problèmes.



Introduire la simulation dans l'enseignement est donc un enjeu majeur. De plus, elle comporte des avantages cognitifs pour comprendre, concevoir et agir, d'autant plus dans un environnement d'investigation et de découverte^[5]. **Une des convictions du collectif proposant ce projet et qui motive ses activités depuis longtemps, est la nécessité d'un certain niveau d'appropriation et de confiance pour que la recherche développée dans les laboratoires soit transformante pour la société** ; et ce, à tous les niveaux : expertises, collectivités locales, citoyens, enseignement pour former les nouvelles générations. Notre hypothèse est qu'une transition rapide et efficace ne peut pas uniquement consister en l'établissement de mesures normatives top-down, qui ont de fortes chances d'être mal acceptées et mal adaptées aux contextes locaux et aux usages individuels. Elle implique un travail avec la population la plus large, car les usages sont d'autant plus divers que les configurations thermiques des bâtiments sont multiples, tout autant que leurs environnements météorologiques et climatiques.

Objectifs et caractère innovant du projet : Le projet vise à accélérer les modalités de transition vers des villes durables, en développant des outils, modèles et méthodes utilisables par les acteurs de la transition. L'objectif est de concevoir, développer et distribuer une chaîne d'outils de simulation et d'analyse (suite de logiciels libres, dite "le simulateur") reposant sur des modèles physiques, qui soit opérationnelle aussi bien du point de vue calculatoire que didactique, pour éclairer les choix d'aménagement urbain de l'habitant au territoire. Du point de vue calculatoire, le simulateur devra être en mesure d'éclairer la conception de bâtiments et quartiers bas carbone en prenant en compte dans les simulations thermiques les caractéristiques des ensembles bâtis et de leurs interactions avec l'environnement, en intégrant les données météorologiques et climatiques présentes et futures. Du point de vue didactique, il devra permettre de concevoir et expérimenter de nouvelles modalités de circulation des savoirs, et de mesurer le potentiel transformatif d'un enseignement usant des outils à la pointe des questions climatiques et d'ingénierie énergétique, en contact étroit avec le monde de la recherche et le "savoir vivant". Ce simulateur sera construit sur la base de logiciels innovants conçus, développés et maintenus par les chercheurs à l'origine de ce projet, qui sont à la fois le fruit et le socle d'un investissement collectif de long terme et dont les vertus didactiques ont déjà été éprouvées au travers de différentes expériences d'enseignement. Ces logiciels sont basés sur une **reformulation probabiliste de la physique en "espaces de chemins"**. Ils permettent d'attaquer des problèmes d'une complexité inenvisageable auparavant, en s'appuyant sur les techniques les plus avancées de l'informatique graphique tout en offrant un regard novateur et intuitif sur les phénomènes physiques modélisés, ouvrant la porte à de nouvelles modalités de transmission. Cette approche rend praticable les calculs de grandeurs locales ou intégrées comme la consommation énergétique globale d'un bâtiment ou d'une ville, intégrant le système dans toutes ses complexités phénoménologique, temporelle et géométrique sans discrétisation de l'espace des phases. Le caractère statistique des formulations en chemins permet de profiter pleinement de l'ensemble des simulations climatiques CMIP et CORDEX afin d'estimer les incertitudes associées aux prédictions de confort thermique ou de consommation énergétique en conditions de changement climatique^[6]. Dans le projet, il ne s'agira pas seulement d'attaquer ces données précalculées mais également de réaliser des simulations directement à l'aide de l'un des deux modèles de climat français, qui fait partie intégrante du simulateur.

1.2. Principales réalisations antérieures

Le collectif porteur du projet est constitué de physiciens du climat impliqués dans l'anticipation du changement climatique, de thermiciens du réseau EDStar engagés depuis deux décennies sur les enjeux de la transition énergétique, rejoints par des chercheurs en informatique, biologistes,



spécialistes du bâtiment, et également didacticiens de la physique qui analysent les modalités de la circulation des savoirs autour de ces travaux. Les résultats décrits ci-dessous et qui fondent la solidité du projet sont déjà pour une part le fruit de travaux multidisciplinaires issus de cette collaboration vieille d'une dizaine d'années. **Le collectif national EDStar porte une recherche en physique et informatique sur le développement de méthodes de calcul statistiques (Monte-Carlo) appliquées à la physique des transferts d'énergie.** Il œuvre à l'appropriation collective des questions énergétiques et à construire des réponses aux enjeux sociétaux et industriels que ces questions soulèvent. Les propositions de modélisation du groupe s'inscrivent dans la filiation des travaux du physicien R. Feynman et du mathématicien M. Kac : en montrant que les énoncés déterministes de modèles physiques pouvaient avoir une traduction probabiliste, ils ont permis d'étendre le champ d'action des méthodes de Monte Carlo connues pour produire des estimateurs statistiques non biaisés de grandeurs d'intérêt. EDStar hérite également des avancées de l'informatique graphique qui, depuis les années 1980, s'est appropriée les propositions issues de la physique statistique pour passer des caps de complexité et de réalisme dans la production d'images de synthèse, aboutissant à une révolution de l'industrie du cinéma. Le collectif EDStar travaille à étendre encore ces propositions, tant sur le plan physique qu'informatique. **Le collectif est ainsi à l'origine de ruptures méthodologiques aux conséquences significatives sur les plans théorique, calculatoire, didactique et interprétatif** concrétisées par la publication de trois articles majeurs sur la dernière année : un article de perspective dans la revue Science Advances^[6] autour de la question énergétique des villes sous un climat changeant, un article de 70 pages dans la revue Plos One qui pose les fondements théoriques associés au cadre méthodologique, cosignés par plus de 40 auteurs dans 17 institutions^[7], et enfin, l'un des quelques articles français acceptés dans l'édition annuelle de la très sélective revue ACM-TOG de la communauté de l'informatique graphique, avec présentation à la conférence SIGGRAPH en Août 2023 à Los Angeles^[8]. Les ruptures décrites dans ces publications permettent notamment : de coupler des physiques de nature très différentes dans un même espace de chemins, tout en profitant des avancées de l'informatique graphique pour prendre en compte la complexité géométrique (e. g. d'une ville jusqu'aux ponts thermiques) ; de simuler une image infrarouge acquise par une caméra thermique sans calcul préalable du champ de température ; de produire des propagateurs et des sensibilités associés à l'observable, offrant de nouvelles perspectives d'analyse et d'accélération des calculs ; d'étendre l'insensibilité à la complexité des méthodes de Monte-Carlo pour des problèmes non linéaires. **Le collectif s'appuie sur l'entreprise |MésO|Star> pour développer et pérenniser au sein et au-delà du groupe des logiciels** qui agrègent les techniques d'informatique graphique et les dernières propositions de description statistique de la physique (<https://www.meso-star.com/projects/misc/about-fr.html>). |MésO|Star> est en grande partie financée par l'Agence Nationale de la Recherche (projets HIGH-TUNE, MCGRAD, MC², MCMET). Elle développe également une offre de service autour du logiciel libre (licence GPL) **Stardis**, sur des questions de thermique couplée en milieu complexe. Stardis permet d'attaquer des questions industrielles réputées difficiles, notamment dans les contrats passés avec EDF, Airbus ou ArcelorMittal et dans le travail engagé avec le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) sur la thermique des bâtiments.

Avec l'arrivée de didacticiens en son sein, le collectif a proposé de nouvelles formes de transmissions utilisant le potentiel offert par la visualisation des chemins échantillonnés dans les simulations. La formulation en chemins, ici celle des transferts thermiques, produit en effet de nouvelles images, un nouveau langage, une nouvelle expression d'une physique pourtant bien connue. Les enseignants-chercheurs d'EDStar expérimentent depuis plusieurs années la

possibilité de prendre appui sur ces représentations pour décaler le regard et contourner certaines difficultés usuelles d'entrée dans ce champ disciplinaire, identifiées en didactique de la physique^[5]. Pour appuyer ces expérimentations, une plateforme web (<http://www.edstar.cnrs.fr/prod/fr/training/tool/therm/>) a été conçue et développée avec un soutien de la région Occitanie (projet CLE EDSTAR 2016, cf. [Section 7](#)). Ce simulateur, utilisable sur smartphone, permet à l'utilisateur de produire en direct une scène thermique bidimensionnelle et de choisir un point où évaluer la température (cf. [Annexe 2](#)). La visualisation des chemins impliqués dans ce calcul permet de construire une intuition dans le cadre interprétatif proposé. Diverses expériences de transmission ont été réalisées avec ce "simulateur thermique 2D" : dans l'enseignement supérieur, dans la formation des enseignants du secondaire en physique et en mathématiques, auprès d'élèves de lycée, ou plus largement auprès d'un public citoyen non accoutumé à la pratique physicienne. Pour analyser ces expérimentations, des didacticiens de la physique et des mathématiques de l'UMR EFTS à Toulouse ont entrepris de construire un cadre de recherche collaboratif avec des enseignants, intégré dans leur questionnement plus large et impliquant directement les physiciens en tant qu'acteurs d'une recherche en didactique des sciences (projet DIDES). **Le collectif est également composé de physiciens du climat qui développent le modèle LMDZ**, composante atmosphérique du modèle global de climat IPSL-CM. Ce modèle fait partie de la vingtaine de modèles qui participent aux exercices CMIP^[9], ^[10]. Le travail sur LMDZ met l'accent sur la représentation et la compréhension des phénomènes atmosphériques (nuages, convection, turbulence) au travers de paramétrisations. Ce lien entre modélisation, simulation et gain en compréhension du système dans toute sa complexité résonne fortement avec les intentions de recherches construites au sein d'EDstar ; il est travaillé en profondeur et depuis de nombreuses années entre les composantes climat et énergie du collectif. Côté climat, les chercheurs du collectif ont également été moteurs au niveau international de l'émergence d'un champ de recherche sur la calibration (tuning) des modèles^[11] et de la diffusion de la méthode d'apprentissage machine par "history matching" qui permet de penser dans un même acte la calibration et la quantification de l'incertitude paramétrique (cf. publication dans "Science Advances",^[12]).

La composante climat du collectif est également impliquée de longue date dans les questions d'articulation science/société, avec la participation à 3 projets ANR interdisciplinaires : [ClimaConf](#)^[13], avec des chercheuses en "Science and Technology studies" (STS) sur "Les questions de la confiance dans le réchauffement global: modélisation du climat, expertise et lien au politique"; [Escape](#)^[14], avec des agronomes sur les "Changements environnementaux et sociaux en Afrique: passé, présent et futur"; [ACASIS](#)^[15] avec des médecins, sur l'"Alerte aux Canicules Au Sahel et à leurs Impacts sur la Santé". L'enseignement des sciences du climat est également un lieu d'implication forte où est développée et expérimentée une approche "par et pour la modélisation" au niveau Universitaire (Licence/Master/Doctorat). Des logiciels encapsulant le modèle LMDZ dans ses versions de recherche les plus récentes sont déployés en salle de cours, sur des ordinateurs individuels ou sur des serveurs. Les enseignants chercheurs mesurent au quotidien dans leurs actes de transmission la puissance de cette approche. Ce travail s'accompagne de la rédaction de textes de référence, comme le chapitre de l'Encyclopédie Universalis (visant les lycées) sur la modélisation du climat écrit conjointement avec une chercheuse historienne des STS^[16]. **Le lien historique entre les parties climat et énergie du collectif s'est renforcé il y a une dizaine d'années et s'est focalisé récemment sur les questions de thermique de la ville**. Ce rapprochement a donné lieu notamment à l'article de perspective publié dans Science Advances^[6] et à l'obtention d'un financement ANR pour le projet



[MC²\[17\]](#) en cours, portant sur les “Simulations Monte-Carlo pour la modélisation du climat urbain”. L’un des axes concerne l’intégration à l’échelle climatique et de la ville de calculs de consommation énergétique et de surchauffe estivale à l’échelle climatique, réalisée en un seul espace de chemins grâce au caractère statistique de l’approche Monte Carlo. Dans ce cadre a également été développé un premier “générateur de ville” permettant, sur la base d’un dessin du cadastre et de certaines instructions concernant la hauteur ou la nature des bâtiments, de générer procéduralement des descriptions géométriques et thermophysiques de villes entières qui soient compatibles avec le logiciel Stardis (cf. [Annexe 3](#)). Fort de ces investissements sur les questions urbaines, le collectif a à nouveau obtenu un financement ANR pour le projet MCMET démarré cette année, et élargissant pour la première fois le consortium à des ingénieurs de recherche du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). **Ce lien entre les groupes climat et énergie du collectif, renforcé par l’arrivée des didacticiens, se décline également sur les questions de la circulation des savoirs et de la recherche de modalités pouvant la favoriser.** Ces questions sont dans l’ADN du collectif. Ce lien fort a notamment abouti à l’écriture d’un projet de déploiement de simulateurs à destination des lycées visant à soutenir la transmission sur les questions de changement climatique et transition énergétique. Ce projet, très bien reçu par les personnes en charge de la définition des programmes (décideurs du ministère de l’éducation nationale) n’a pas pu être financé jusque-là. Le projet LAVEC contribuera à cet objectif. Autour de ces projets, la dimension didactique du collectif s’inscrit dans une problématique plus vaste du rôle crucial de la modélisation et de la simulation dans l’enseignement et l’apprentissage de la physique^{[18], [19]}. **Sur le plan de la circulation des savoirs au sein même de la communauté scientifique, le collectif se retrouve une semaine par an au Centre d’Accueil CAP Saint Front en Haute-Loire** (une cinquantaine de personnes à chaque session), dans une forme proche d’une résidence artistique. Les ateliers de travail de ces résidences, qui alimentent les dynamiques de recherches du collectif tout au long de l’année, se définissent au fil de l’eau, de façon collective. Ils font interagir dans une même séance les chercheurs à la pointe des aspects physiques ou informatiques discutés, avec des étudiants en stage ou en thèse, des chercheurs extérieurs à la discipline et novices sur la question discutée, et parfois des non scientifiques. Ces conditions immersives sont propices à une transmission de savoirs dite par frayage^[20], d’une efficacité redoutable et sans doute difficile à concevoir tant que l’on n’y a pas participé. Un temps fort de cette semaine est la séance publique du jeudi soir, annoncée dans la presse locale, préparée les soirs qui précèdent avec des personnes des environs, pensée dans un esprit d’éducation populaire, et ouverte à toutes les personnes qui souhaiteraient venir travailler sur un thème défini autour de préoccupations locales (e.g. : modélisation du climat, modélisation de l’évolution de la population du plateau de Saint Front, thermique du bâtiment, pompes à chaleur). **Le Centre d’Accueil de Saint-Front**, d’une capacité d’hébergement de 130 lits, a pour vocation l’accueil de séjour éducatifs, vacances, groupes, séminaires, familles. Résolument engagé dans l’éducation populaire, il est issu d’un projet associatif regroupant en sa gouvernance Les CEMEA, La ligue de l’enseignement de la Haute-Loire et la commune de Saint-Front. Depuis plus de 30 ans le centre s’inscrit dans une démarche environnementale et écocitoyenne qui s’est traduit par l’obtention du label “Citoyenneté Environnement développement durable” en 1993. Grâce à une recherche constante d’amélioration de son projet et de ses équipements face aux enjeux climatiques, le Centre a obtenu l’Ecolabel Européen décerné par l’AFNOR en juin 2023. C’est à l’occasion de la dernière résidence du collectif, marquée notamment par l’arrivée de spécialistes du bâtiment du CSTB, la récente ecolabellisation du site, et de la volonté de s’investir dans le PEPR VBDI, qu’est née comme une évidence l’idée de bâtir le projet LAVEC avec en son cœur le site du CAP Saint



Front comme lieu d'expérimentation à la fois de circulation des savoirs et des questions techniques et scientifiques spécifiques du couplage bâtiment-climat.

2. Description détaillée du projet

2.1. Description du projet, stratégie scientifique

Nos recherches s'inscrivent dans les grands défis 1 Changement Climatique, et 3 Villes et bâtiments sobres et frugaux et sont résolument tournées vers les questions de participation citoyenne et de gouvernance qui sont au cœur du PEPR. A cette fin, nous développerons une chaîne d'outils de simulation thermique du bâtiment sous le climat ("le simulateur") qui soit capable d'éclairer à la fois les professionnels du bâtiment et les citoyens. Le verrou à lever est celui du passage à l'échelle : du local au global, du processus au système, de la preuve de concept à l'opérationnel, de quelques interlocuteurs formés à l'ensemble des acteurs impliqués dans la cité... Les questions de passage à l'échelle seront abordées dans le cadre d'une expérimentation prototype autour du site de CAP Saint-Front, profitant de l'histoire au long cours entre le collectif de recherche et l'association qui gère le site. Ce travail sera réalisé en interaction forte avec les acteurs du Centre Opérationnel (CO) MISCIB, afin que le CO puisse déployer, dans un temps plus long, à l'échelle nationale, dans des cadres professionnels comme de transmission de savoirs, les outils et modèles multi-physiques et multi-échelles issus de nos travaux. Au cœur du projet, il s'agira de développer le simulateur, basé sur les outils portés par le collectif : LMDZ pour le climat, Stardis pour la thermique, city_generator2 pour générer la géométrie de bâtiments, htrdr pour le rayonnement. La recherche portera sur le couplage et l'enrichissement physique et informatique de ces composantes (amélioration des simulations du bâtiment, confrontation aux observations, calculs de métriques non linéaires de consommation) ainsi que sur leur opérationnalité calculatoire et didactique. Ce simulateur visera depuis l'expertise pour l'aide à la décision jusqu'aux jeunes publics de l'enseignement primaire et secondaire. Une des ambitions de LAVEC est ainsi de faire de ce simulateur à la pointe de la recherche, un "jeu d'enfant". En utilisant la simulation comme un outil pédagogique puissant pour faciliter l'enseignement et la diffusion des savoirs en construction, nous chercherons à rendre les concepts complexes plus accessibles, en offrant une expérience immersive et pratique. La démarche adoptée questionne dialectiquement les conditions d'appropriation des savoirs de la physique sous-jacente aux enjeux de la transition énergétique dans le but d'une transformation des rapports et des usages des publics non spécialistes, tant scolaires que non scolaires, et la nature des outils de simulation qui leur sont destinés à cet effet.

Le projet s'articule autour de 4 axes, illustrés par la **Figure 1** et décrits en détails en [Section 2](#) : l'Axe 1 (Porteur LAPLACE) concerne le développement de logiciels permettant de renseigner relativement facilement les données nécessaires aux calculs thermiques 3D dans une ville ou un bâtiment ; l'Axe 2 (Porteur RAPSODEE) porte sur l'instrumentation du site du CAP Saint Front et la comparaison des observations aux simulations ; l'Axe 3 (Porteur LMD) porte sur la simulation des bâtiments ou des villes couplées à la donnée météorologique ou climatique. L'Axe 4 (Porteur EFTS) est dédié à des questions de recherches en didactique de la physique, notamment sur l'importance du rôle de la simulation numérique dans la transmission des savoirs et sur le potentiel d'une reformulation "en chemins" de la physique pour une véritable montée en compréhension des questions scientifiques de la transition énergétique et de leurs enjeux. Cette dimension de circulation des savoirs, et l'idée que le citoyen est aussi un chercheur de "la transition énergétique", est présente dans tous les axes, avec des rétroactions fortes tout au long du projet des retours d'expérience des différents publics sur les choix de développement du simulateur.



Figure 1 : Illustration de la structuration des axes et de leurs articulations (les flèches bleues) en une roue de la circulation des savoirs. Les cadres rouges signalent : les illustrations réalisées avec les logiciels de simulation disponibles au début du projet, une classe devant le bâtiment de Cap Saint Front et une salle de classe utilisant LMDZ.

2.2. Présentation scientifique et technique du projet

Axe 1 : Du dessin des bâtiments aux calculs thermiques

Une simulation de thermique 3D requiert une description 3D de la géométrie des bâtiments qui doit respecter certaines contraintes. On parle de conformité. Le calcul nécessite également de prescrire les propriétés physiques des matériaux, les conditions extérieures, le scénario d'usage, etc., qui devront être affectées à l'élément correspondant du système. L'approche la plus commune dans la production de géométries et de maillages conformes est de s'appuyer sur les outils de CAO, tels que Catia ou gmsih qui utilise les bibliothèques d'Open Cascade et est un code libre. Il existe nombre de logiciels qui permettent une visualisation 3D des géométries sans pour autant satisfaire l'exigence de conformité. Dans le cas du solveur thermique Stardis, que nous prévoyons d'utiliser dans nos simulations, la géométrie est attendue sous la forme d'un maillage surfacique triangulé conforme, au format standard STL.

1.1 Une ville ou un bâtiment minimaliste à partir d'un dessin d'enfant : Pour permettre une pratique simple et ludique ("jeu d'enfant"), à même notamment de captiver le jeune public et de toucher des publics adultes non scientifiques, nous proposons de créer les outils logiciels permettant de partir d'un simple dessin 2D de bâtiment (ou de quelques bâtiments) pour en générer la géométrie 3D conforme et en faire la simulation thermique 3D avec le solveur Stardis. Ce travail s'appuiera sur le city_generator2 développé dans le cadre de l'ANR MC² (cf. [Annexe 3](#)), un logiciel de génération procédurale de géométries 3D conformes de bâtiments (jusqu'à l'échelle de la ville) à partir de leurs empreintes au sol (de type cadastre) et du type de bâti (épaisseur et nature des murs, des isolants, etc.). Il s'agira de développer un module de dessin permettant le tracé du contour des bâtiments et l'attribution de propriétés macroscopiques, telles que la classe énergétique du bâtiment ou son type de construction parmi un catalogue prédéfini. On peut aussi imaginer ajouter une bibliothèque d'objets à positionner dans la scène pour la rendre plus réaliste (végétaux, mobilier urbain, etc.). Ce module permettra que même un collégien ou un lycéen, tels que ceux accueillis au Cap Saint-Front, puisse dessiner sa maison et son environnement, en faire

la simulation thermique, modifier quelques hypothèses (météo, plantation d'arbres, etc.) pour étudier les différences de consommation hivernale, de confort d'été, etc. Nous prévoyons ensuite de partir des retours et des demandes des utilisateurs pour définir des extensions, sans toutefois dénaturer l'approche "jeu d'enfant" de l'outil.

1.2 Le bâtiment détaillé à partir d'un dessin d'expert/architecte : Ce second volet vise à créer une source de données pour la simulation thermique 3D selon une approche technique experte, en se connectant aux outils logiciels dédiés à l'architecture. Les logiciels d'architecture disposent déjà souvent de modules de calcul thermique ou de formats d'exportation de données permettant d'alimenter divers logiciels thermiques plus ou moins spécialisés bâtiment. Notamment les calculs réglementaires selon la méthode Th-BCE du CSTB et les calculs de STD avec les solveurs EnergyPlus, Pléiades ou Perrenoud sont monnaie courante. Pour autant, ces calculs thermiques, souvent associés à une visualisation 3D des bâtiments, n'ont rien à voir avec notre proposition : le niveau de détail géométrique et la durée des périodes simulées permis par ces approches sont très limités. Par exemple, l'approche Th-BCE ne prend en entrée qu'une description grossière (surface des parois, longueurs de contact, etc.) qui rend compte d'un bâtiment en quelques dizaines de grandeurs, et la description en entrée des logiciels STD tels que EnergyPlus, bien que 3D, ne peut intégrer tous les rapports d'échelle, du plus petit détail d'un bâtiment au quartier ou à la ville. En outre, ces logiciels sont incapables de simuler un ensemble de bâtiments sur des durées de plusieurs années. Dans cette partie nous souhaitons utiliser le bâtiment de Cap Saint-Front comme cas d'étude. Pour démarrer nous prévoyons une prestation visant à créer un modèle 3D du centre tel qu'attendu par le solveur stardis, et de créer conjointement la documentation de la démarche (tutoriel, scripts logiciels utilisés, etc.). La prestation devra privilégier les logiciels libres pour favoriser la diffusion du savoir, et les formats de données standard pour les étapes intermédiaires, tel que STEP (STandard for the Exchange of Product) pour la représentation de la CAO. Dans une deuxième prestation, nous visons la mise au point et la validation d'un processus qui parte d'un plan, tel qu'issu d'un logiciel d'architecture, et qui produise une représentation CAO 3D du bâtiment au format STEP qui serait ensuite insérée dans une ville en vue de la simulation thermique de l'ensemble. A noter qu'il serait alors possible d'utiliser toute description STEP préexistante. Ce processus nécessitera une évolution de city_generator2, à minima pour y intégrer l'importation d'items au format STEP, et possiblement d'autres enrichissements devenus nécessaires (sol non plat, etc.).

Axe 2 : L'instrumentation et la thermique du bâtiment de Cap Saint-Front

2.1 Caractérisation des performances énergétiques globales du bâtiment : Le cas d'étude expérimental du projet est l'annexe du bâtiment de Cap St Front. Le bâtiment sera instrumenté (CDD de 1an) afin de mesurer sa consommation énergétique pendant la période de chauffe (environ d'octobre à mai) ainsi que la surchauffe estivale en raison des apports solaires conséquents liés à la présence de baies vitrées orientées sud-est (**D2.1**). Malgré l'altitude du site (1200m) des événements de surchauffe estivale commencent à être une question pour la gestion du lieu. La performance thermique de l'enveloppe du bâtiment sera mesurée par la méthode normée de co-heating (**M2.1.2**). Cette mesure de référence consiste à maintenir une température constante dans le bâtiment pendant 2 à 3 semaines en mesurant les apports de chaleur et en absence d'utilisateurs pour mesurer le coefficient de pertes thermiques global^[21]. Ceci nécessite de mesurer la puissance thermique de la pompe à chaleur dissipée dans le bâtiment avec un compteur d'énergie et la température et l'humidité à divers endroits du bâtiment. Il faut aussi mesurer finement la météorologie à laquelle est soumis le bâtiment - température et humidité à

l'extérieur, vitesse et direction du vent, pression atmosphérique - en installant une station météorologique sur site. Nous mesurerons aussi les composantes directe et diffuse du spectre solaire ainsi que le rayonnement infrarouge descendant émis par la surface terrestre et l'atmosphère avec un pyréliomètre monté sur tracker, un pyranomètre et un pyrgéomètre. Les données mesurées seront intégrées au réseau d'observations météorologiques mondial (D2.2). Toutes ces mesures sont nécessaires pour confronter l'expérimental à la STD du bâtiment (Axes 2.3 et 3.1, M2.1.1). Les différents capteurs seront maintenus pendant toute la durée du projet pour évaluer la performance thermique du bâtiment en présence d'utilisateurs (M2.1.3). Dans la mesure du possible, l'instrumentation est pensée pour être peu chère et l'acquisition des données sera effectuée avec des outils libres afin de faciliter sa répliquabilité, notamment par des citoyens.

2.2 Imagerie, inversion et caractérisation des murs et des ponts thermiques : Les ponts thermiques représentent une part importante des pertes *a fortiori* dans les bâtiments performants. Ces ponts thermiques seront détectés et caractérisés par thermographie infrarouge sur la gamme de longueurs d'ondes 8-14 μ m adaptée aux niveaux de température du bâtiment. Les températures et les émissivités des surfaces seront mesurées par une caméra infrarouge ayant une bonne sensibilité thermique (40mK) et spatiale (D2.4). Les images infrarouges mesurées seront comparées à des images infrarouges générées à partir du solveur stardis en plaçant une caméra virtuelle dans la géométrie détaillée du bâtiment prévue à l'axe 1. Le même modèle thermique est ainsi utilisé pour simuler l'évolution de la température ou la consommation énergétique du bâtiment mais aussi pour simuler une image infrarouge. Nous utiliserons ces mesures infrarouge et nous nous appuierons sur les résultats du projet ANR MCMET pour inverser les mesures et remonter aux propriétés thermiques et à la composition du mur afin d'affiner le modèle. Deux caméras infrarouges seront mises à disposition des collégiens, des lycéens, des étudiants - notamment ceux du parcours bâtiment à énergie positive à IMT Mines Albi - et des citoyens pour qu'ils puissent détecter des ponts thermiques et ce à des fins pédagogiques et de circulation des savoirs (Axe 4).

2.3 Validation du modèle thermique du bâtiment : Le modèle thermique du bâtiment de Cap St Front sera construit à partir de la géométrie détaillée du bâtiment (Axe 1.2) ainsi que des propriétés thermiques des parois, des menuiseries et de la toiture du bâtiment. Dans un premier temps, le modèle thermique sera alimenté à partir des données mesurées (émissivités...) et des données du rapport d'audit énergétique du centre Cap St Front (épaisseur d'isolant des plafonds et des murs...). L'implication directe des usagers du centre permettra de conforter ces données d'entrée du modèle. Les propriétés thermiques des murs pourront être affinées grâce à la méthode d'inversion (Axe 2.2). Les apports de chaleur ainsi que les sollicitations extérieures (apports solaires, température...) seront directement implémentés dans le modèle. La STD sera effectuée avec le solveur stardis, basé sur les méthodes de Monte Carlo, qui permet notamment de s'affranchir d'hypothèses sur la complexité géométrique du bâtiment^[6] ainsi que de certains paramètres libres comme les ponts thermiques (D2.3). En effet, ceux-ci sont directement pris en compte dans le calcul sans avoir besoin d'avoir recours à un sous-modèle. Les résultats de la méthode de co-heating (Axe 2.1) seront comparés à une simulation avec le solveur Stardis en tenant compte des données météorologiques et de la géométrie détaillée du bâtiment. Cette validation du modèle thermique du bâtiment est un pré-requis pour pouvoir placer le bâtiment sous un climat changeant (Axe 3) et pour le passage à l'échelle de la ville. Ce travail fera l'objet d'une thèse (D2.5). Enfin, nous comparerons aussi les performances thermiques d'un bâtiment minimaliste (à partir d'un dessin d'enfant) à celles du bâtiment détaillé.

Axe 3 : La thermique des bâtiments sous un climat changeant

3.1 Développement d'un simulateur couplant bâtiment et climat : Le projet MC² a permis de développer une interface pour forcer un calcul de bâtiment avec une météorologie observée ou simulée. On fournit au calcul thermique du bâtiment à une fréquence de typiquement 1h la température de l'air, une température radiative, des flux solaires direct et diffus ainsi qu'une estimation de l'intensité de la turbulence. Il s'agira ici tout d'abord de développer un outil de simulation (2 ans de CDD) permettant, une fois le bâtiment ou la ville spécifiée (dessin d'enfant, Axe 1.1 ou dessin d'architecte, Axe 1.2) et la donnée nécessaire au calcul de thermique du bâtiment calculée, de mettre en place automatiquement des simulations couplant le bâtiment (ou la ville) et les données météorologiques (**M3.1.1**) et de visualiser automatiquement les résultats (valeurs de température, consommation) et les chemins impliqués dans l'obtention de ces résultats (**M3.1.3**). Les données météorologiques pourront provenir soit d'observations (notamment sur le site de Cap Saint-Front, Axe 2.1), soit de l'extraction au point considéré de données météorologiques issues d'archives de simulations précédemment effectuées (et notamment les simulations multi-modèles multi-scenario issues des projets CMIP et CORDEX, cf. [Section 1.1](#)), ou encore de simulations effectuées sur des périodes courtes de l'ordre de quelques semaines à quelques années avec le modèle atmosphérique LMDZ. La mise en œuvre automatique de LMDZ sera intégrée dans le simulateur (**M3.1.2**) pour être mise à la portée des lycéens, des animateurs de jeunes publics, des acteurs du bâtiment ou de l'aménagement du territoire.

3.2 Les bâtiments sous un climat en surchauffe : projections et incertitudes : Le forçage du simulateur par des données globales CMIP ou raffinées CORDEX permettra d'effectuer des calculs en climat présent aussi bien que futur, et de tester des hypothèses de rénovation énergétique en tenant compte des projections du changement climatique et de leur incertitude. Ces calculs pourront se faire soit avec une "maison équivalente" (issue d'un dessin d'enfant) soit sur une description détaillée du bâtiment, soit pour une ville générée procéduralement à partir d'un cadastre. Pour cela, il est nécessaire de définir des métriques (consommation annuelle de chauffage ou de climatisation par exemple). Ces métriques font généralement apparaître des non-linéarités qui rendent plus difficile le calcul en chemins. Beaucoup de solutions sont explorées dans la recherche du collectif qui permettent d'apporter des réponses en pratique. Différentes méthodes seront explorées et certaines privilégiées pour offrir des outils pratiques d'évaluation des choix de rénovation (**M3.2.1**). Pour les périodes de surchauffe, on commencera à introduire dans les calculs des possibilités d'usage de type ventilation naturelle ou ombre plutôt que l'utilisation de climatisation, ce qui conduira à d'autres types de modèles à introduire dans le simulateur. L'approche statistique inhérente à l'algorithme de Monte-Carlo permettra d'explorer toutes les dimensions du problème, en voyant notamment les différentes simulations disponibles dans les données CMIP/CORDEX comme une variable aléatoire ^[6] et de quantifier les différentes sources d'incertitudes (**D3.1, D3.4**).

3.3 Raffinement de la représentation des couplages bâtiments/atmosphère

Si l'assemblage des modèles physiques et logiciels existants permet de se projeter dès le début du projet sur le montage d'un simulateur utilisable par de larges publics et de son utilisation pour éclairer des politiques de construction/rénovation/adaptation, certains aspects doivent encore être améliorés pour compléter le modèle intégré (**M3.3.1**). L'un d'eux concerne la simulation du rayonnement solaire en présence de nuages. A l'heure actuelle, les données issues des simulations climatiques ne permettent pas de prédire la distribution spatiale des flux solaires directs et diffus incidents sur les bâtiments. Une piste qui sera explorée est de désagréger la donnée moyenne sortie du modèle de climat pour générer aléatoirement des champs nuageux 3D

détaillés dans lesquels les chemins radiatifs pourront être simulés, par exemple à l'aide du logiciel htrdr (thèse au CNRM, **D3.2**). L'utilisation du simulateur alimenté par les sorties du modèle LMDZ permettra de raffiner et d'évaluer localement la représentation météorologique et éventuellement de représenter la rétroaction d'une ville sur le climat local (îlot de chaleur urbain) et les observations permettront de faire des calculs de référence, intéressants tant pour la transmission que pour la validation de LMDZ. On améliorera notamment la modélisation des coefficients d'échange h entre l'atmosphère et les murs. On évaluera les modèles de h qui tiennent compte de la turbulence prédite par le modèle météorologique, en comparant les simulations à des mesures sur le site (Axe 2.1). Ce travail sera mené au cours d'une thèse au LMD (**D3.3**) qui s'intéressera plus généralement à l'amélioration de la représentation du couplage bâtiment/climat, en se focalisant principalement sur le site du CAP Saint-Front.

Axe 4 : La circulation des savoirs

Le cadre de travail adopté dans cet axe consacré à la circulation des savoirs se veut collaboratif, réunissant physiciens, informaticiens, didacticiens, animateurs scientifiques du CAP St Front et enseignants, au sein de groupes à géométries variables selon les questions. L'objectif est de concevoir des outils répondant aux exigences des divers utilisateurs sur le plan ergonomique (facilité de prise en main et d'utilisation), mésogénétique (adéquation des choix de représentations et des tâches aux savoirs visés, ...), d'enseignement (choix didactiques associés aux modalités de transmission (public, dispositif, temporalité) et aux spécificités du contexte (corrélation des sorties des simulations aux mesures effectuées sur le bâtiment du CAP St Front). De plus, il s'agira de proposer des scénarios d'utilisation adaptés à situations de transmission à des publics particuliers dans des conditions spécifiques de sorte à accompagner à terme la diffusion des outils de documents d'utilisation. Cette recherche collaborative dans ce contexte d'une boucle recherche-conception d'outils-transmission singulièrement réduite spatialement et temporellement nous conduit à explorer au moins deux dimensions de la circulation des savoirs entre les divers acteurs : celle de la construction collective des savoirs et des représentations (langage, sémiotique) et celle de la pratique de transmission (via la simulation) associée à des choix de représentations. Les enquêtes qui seront menées dans le projet et les analyses épistémologiques et didactiques visent à identifier l'émergence de nouvelles sémioses et formes discursives, à l'origine de changements dans les rapports aux savoirs et les comportements induits, indicateurs de l'appropriation du savoir visé.

4.1 La simulation numérique dans l'enseignement : Ce volet s'inscrit dans la continuité d'expériences d'enseignement menées jusqu'ici par les enseignants-chercheurs impliqués dans le projet, autour de LMDZ et du simulateur thermique 2D EDStar avec des étudiants de licence et de master, des collégiens et des lycéens, des étudiants en école d'ingénieurs, et des professeurs de collège et lycée en formation et expérimentés. Le déploiement du nouveau simulateur sera expérimenté dans un premier temps dans le cadre de ces enseignements dans un processus itératif dynamique, où la définition des différentes versions des simulateurs s'entrelace harmonieusement avec des expérimentations variées. L'interaction entre ces deux éléments est essentielle pour garantir l'efficacité et la pertinence des outils pédagogiques (**D4.1**) que nous développons. Cette synergie entre la conceptualisation des simulateurs et les retours issus des expérimentations renforcera également la qualité et la pertinence des ressources mises à disposition des utilisateurs. Ce travail sera associé à celui d'une thèse (Thèse 4) qui s'intéressera plus généralement aux processus de circulation des savoirs présidant à la construction de la chaîne d'outils et à l'évolution des comportements que l'utilisation de cette chaîne induit.

4.2 Les formulations et visualisation en chemins pour s'approprier la physique : Les expériences réalisées jusqu'à présent, avec des publics scolaires et non scolaires, montrent les effets positifs de l'approche "en chemins" dans la compréhension des phénomènes énergétiques. Il s'agira ici de montrer le caractère transformant de la proposition au cours d'une thèse (Thèse 5) centrée sur l'enseignement-apprentissage de l'énergie à travers sa reformulation en espaces de chemins. Le travail comprendra l'examen des attentes sociétales liées à l'éducation à l'énergie, une étude de la genèse de la reformulation statistique de l'énergie, les apports potentiels de la formulation en espaces de chemins sur les principales difficultés récurrentes de l'apprentissage de l'énergie (ex. : confusion entre température et chaleur), et une analyse des savoirs construits lors de travaux conduits avec des physiciens et divers publics pour comprendre les principaux enjeux de savoir. Cette phase initiale sera suivie de la conception d'ingénieries didactiques expérimentales (**D4.2**) en collaboration avec les physiciens et des enseignants, associée à une étude de l'évolution du rapport des enseignants et des élèves-étudiants sur l'énergie et de leurs compétences en analyse de systèmes thermiques complexes.

4.3 Des expérimentations jeunes/tous publics (non-scientifiques) : Au cœur de notre démarche éducative, nous accordons une importance particulière à la collaboration avec les animateurs du site de Cap Saint Front qui, fort de leur expertise en communication scientifique auprès des jeunes, apportent une perspective précieuse au projet. Chercheurs et animateurs s'engagent dans un processus d'observation mutuelle et d'apprentissage. Ensemble, notre objectif est de construire des contenus (**D4.3**) spécifiquement adaptés aux jeunes publics, allant des classes de fin de primaire au lycée, et d'élaborer des documents pédagogiques (**D4.4**) qui soient à la hauteur des attentes respectives. Cela contribue à l'émergence de contenus éducatifs qui répondent non seulement aux besoins des jeunes publics, mais qui visent également l'accessibilité au "tout public", favorisant ainsi une compréhension raisonnablement commune des enjeux scientifiques de la transition tels que nous les travaillons. Nous nous appuyerons sur le conseil scientifique et les personnes qui manifestent l'intérêt d'être en relation avec ce projet pour en diversifier les perspectives de recherche (cf. [Section 3.3](#)).

2.3. Déroulement, indicateurs et jalons

Le projet sera rythmé par le déploiement de 3 versions successives du simulateur avec 3 phases répétées : 1) Conception / développement / mise à disposition d'une version au début du cycle ; 2) Acculturation et formation des animateurs à l'outil / choix didactiques et construction de scénarios / Expérimentation en situations d'enseignement; 3) Retour d'expérience / retour sur les spécifications du simulateur pour la prochaine version (Tableau 1). La mise à disposition des simulateurs sera associée à des réunions plénières du projet.

Tableau 1 : Versions successives du simulateur avec trimestre de mise à disposition.

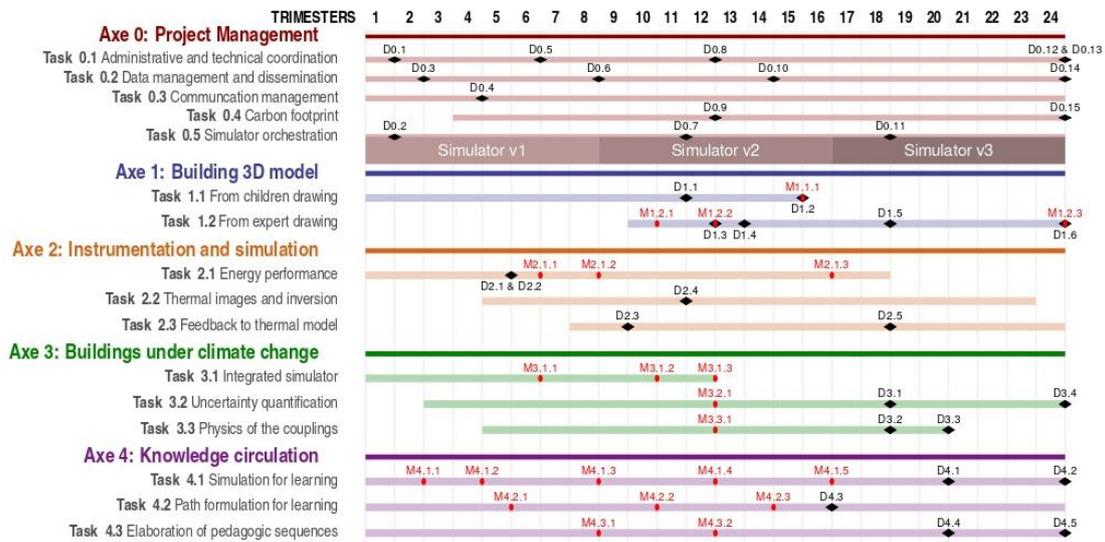
V1 (T1) : basée sur l'existant (géométrie du bâtiment et météo constante) mis en œuvre par les développeurs, à destination des enseignants/animateurs/élèves ingénieurs/licence Objectifs de transmissions : physique des transferts dans le bâtiment, inertie et ponts thermiques
V2 (T11) : V1 + accès à différentes météo et déploiement de LMDZ, interface permettant de construire le bâtiment et contrôler les simulations : objectif déploiement à grande échelle de l'outil. Objectifs de transmission additionnels : variabilité, scénarios de chauffage, couplages avec la météo
V3 (T18) : V2 + Outils statistiques permettant d'attaquer un ensemble de simulations climatiques (CMIP/Cordex) et dessin d'architecte pour générer la géométrie. Objectifs additionnels : Changement climatique et quantification des incertitudes. Aide à la décision.

Suivi des indicateurs/livrables et des jalons : L'équipe formée par les chercheurs/chercheuses responsables des axes, en collaboration avec la coordinatrice, suivra l'avancement du projet, en vérifiant que les jalons sont atteints et que les livrables (Tableau 2) sont rendus dans les délais ([Gantt](#)).

Tableau 2 : Liste des tâches pour assurer la coordination du projet LAVEC et livrables (D) et jalons (M) associés aux activités scientifiques. [T pour trimestre]

Axe n°0	Coordination et gestion du projet
<p>Tâche 0.1: Coordination administrative et technique (T1-T24) Recrutement du personnel non permanents/Comparaison des avancées avec le calendrier initial/Vérification de la date limite de dépôt des livrables, des indicateurs et des plans de contingence/Organisation des réunions périodiques sur l'état d'avancement tous les 6 mois/Contrôle et gestion du temps de travail et les dépenses consacrées au projet en fonction du travail prévu/Assurer le lien avec l'ANR et le CNRS tout au long du projet; Tâche 0.2: Plan de gestion des données et Gestion de la propriété intellectuelle (PI), valorisation scientifique et diffusion (T1-T24) Mise en place de l'accord de consortium avec des règles et des procédures de protection de la PI pour chaque partenaire/Coordination de la participation à des congrès internationaux et nationaux à comité de lecture; Tâche 0.3: Gestion de la communication (T1-T24) Mise en place le programme avec le Centre de Saint-Front. Tâche 0.4: Orchestration du déploiement des versions successives du simulateur; Tâche 0.5: Mise en place de la stratégie évaluation 'empreinte carbone' du projet au moyen de l'outil Labo 1.5et analyse (T4-T24).</p>	
<p>D0.1: Accord de consortium signé (T1); D0.5, 0.8: Comptes-rendus scientifiques et financiers intermédiaires (T6, T12); D0.4: Plan de communication (T4); D0.12, 0.13: Comptes-rendus scientifiques et financiers finaux (T24); D0.3, 0.6, 0.10 & 0.14: Plans de gestion de données (T2, T8, T14 & T24); D0.2, L0.7 & L0.11: Versions 1,2 & 3 du simulateur (T1,T11 & T18); D0.9 & D0.15: Bilan gaz à effet de serre (T12) et estimation du bilan carbone (T24).</p>	
Axe n°1	Du dessin des bâtiments aux calculs thermiques
<p>M1.1.1 : Production des CAO enfantines et développement interface (15); M1.2.1 : Production d'une géométrie détaillée du bâtiment de Cap Saint Front (T12); M1.2.2: Prestation d'architecte (T10); M1.2.3: Développement et intégration des logiciels (T24).</p>	
<p>D1.1: Interface "jeu d'enfant" incluant la CAO à partir d'un dessin (pour SV2) (T11); D1.2 : Version finale de l'interface "jeu d'enfant" (T15); D1.3: CAO détaillée du bâtiment (T12); D1.4 : Etude des options (benchmark) pour la génération des CAO détaillées et prise de décision (T13); D1.5 : Outil de génération d'une CAO détaillée (pour SV3) (T18); D1.6 : Version finale des logiciels d'interfaces de génération des bâtiments et contrôle du simulateur (T24).</p>	
<p>Co-encadrement des recherches postdoctorales PDoc1 (T6-T13) & PDoc2 (T12-T19) par S. Blanco et R. Fournier au Laplace et prestations architecte et développement de CAO couplée.</p>	
Axe n°2	L'instrumentation et la thermique du bâtiment de Cap Saint-Front
<p>M2.1.1: Mesures journalières météorologiques et thermiques du bâtiment vide (nécessite M2.1.1 et M2.1.2 terminé, durée 1 mois, T6); M2.1.2: Calcul du coefficient de perte global par la méthode de co-heating (nécessite M2.1.1 terminé, T8); M2.1.3: Mesures journalières météorologiques et thermiques du bâtiment habité (après M2.1.1) (T16).</p>	
<p>D2.1: Instrumentation du bâtiment finalisée (T5); D2.2: Installation de la station météo finalisée (T5) ; D2.3: Simulation thermique bâtiment très simplifiée avec météo (pour SV2) (T8); D2.4: Méthodologie de thermographie infrarouge et d'inversion finalisée (T10); D2.5: Thèse et publications sur la simulation thermique dynamique du bâtiment de Cap St Front avec validation expérimentale (nourrit le simulateur SV3) (T18).</p>	
<p>Co-encadrement/Co-direction: Thèse 1 sera dirigée par S. Eibner et F. Hourdin entre LMD et Rapsodee (T7-T18). Recrutement Ingénieur d'étude (IE) (T3-T6).</p>	
Axe n°3	La thermique des bâtiments sous un climat changeant
<p>M3.1.1: Inclusion de la données météo (observée, CMIP/Cordex) dans le simulateur (pour SV2) (T6) ; M3.1.2: Automatisation du déploiement des simulations LMDZ et intégration au simulateur (pour SV2) (T10); M3.1.3 : Inclusion dans le simulateur de la visualisation des chemins dans le bâtiment et l'atmosphère (T12) ; M3.2.1 : Choix de métriques (consommation/confort) et implémentation (y compris non linéaires) (T12) ; M3.3.1 : Evaluation des simulations météorologiques à Cap Saint Front (T12).</p>	
<p>D3.1 : Outil de quantification des incertitudes utilisant le simulateur et les simulations CMIP/Cordex (T18); D3.2 : Thèse et publications sur rayonnement nuages (T20); D3.3: Thèse et publications sur l'amélioration des simulations couplées. Modèle de h (T18); D3.4 : Publication sur l'utilisation des outils développés pour définir un service climatique (T24).</p>	
<p>Co-encadrement/Co-direction: Thèse 2 sera dirigée par F. Hourdin au LMD (T6-T17) / Thèse 3 sera dirigée par F. Couvreur et encadrée par N. Villefranques (T8-T19) / Recherches postdoctorales (PDoc3) encadrées par F. Hourdin et J.B. Madeleine au LMD (T12-T19). Recrutement Ingénieur de Recherche (IR) (T1-T8).</p>	
Axe n°4	La circulation des savoirs
<p>M4.1.1 : Fin des spécifications de la V1 du simulateur et des projections didactiques (T2); M4.1.2 : Début des expérimentations du simulateur V1 avec des étudiants de l'enseignement supérieur (T4); M4.1.3 : Début des expérimentations en collège et lycée avec simulateur V1 (T8); M4.1.4 : Spécifications du simulateur V2 (T12); M4.1.5 : Début des expérimentations avec simulateur V2 en collège et lycée (T16); M4.2.1 : Fin de l'enquête sur les conceptions des élèves sur les échanges d'énergie (T5) ; M4.2.3 : Fin des expérimentations dans le secondaire de l'enseignement de la thermique en espaces de chemins (T10); M4.2.4 : Fin de l'étude de l'évolution des conceptions des enseignants et des élèves du secondaire aux échanges d'énergie (T14) ; M4.3.1 : Début du travail de co-conception de situations d'enseignement avec les animateurs du centre CAP St Front sur la base des études préalables conduites avec le simulateur V1 (T8); M4.3.2 : Ressources pédagogiques intermédiaires utilisables par les animateurs du CAP (T12).</p>	
<p>D4.1 : Thèse et publications sur l'enseignement du changement climatique via la simulation (T20); D4.2: Thèse et publications en didactique de la thermique sur sa reformulation en espaces de chemins (T16) ; D4.3 Ressources intermédiaires destinées aux formateurs à l'animation pédagogique du CAP (T20) ; D4.4 : Version du simulateur destiné aux collèges et lycées et les centres d'animation scientifiques (T24); D4.5 : Ressources pédagogiques (écrits, tutoriels, documents hypermédias) destinées aux utilisateurs du simulateur (enseignants, élèves ingénieur.e.s/Masters) (T24).</p>	
<p>Co-encadrement/Co-direction: Thèse 4 sera dirigée par R. Fournier et co-encadrée par L.Pélissier entre le Laplace et l'EFTS (T9-T20) et Thèse 5 dirigée par S. Blanco et co-encadrée par L. Pélissier entre le Laplace et l'EFTS (T9-T20).</p>	

Calendrier (Diagramme Gantt)



Points de vigilance/ Risques/Plan de contingences : En soit, ce projet est peu risqué d'un point de vue technique car les outils existants nous permettront de tester la preuve de concept dans tous les cas. En effet, le simulateur 1 possédant un certain nombre de paramètres à varier pourra déjà répondre à des objectifs d'enseignement sans difficultés. Si une seule étape de développement des simulateurs n'aboutit pas, celle-ci ne remettra pas en question le projet. **Axe 1** : Ici que des points de vigilance sont à noter : (i) la possession de plans de masse trop peu détaillés ne permettant pas d'avoir une description fine du bâtiment à fournir aux architectes. Si tel est le cas, le simulateur actuel 'city_generator' sera utilisé pour fournir une esquisse 2D/une CAO déployable depuis des standards du monde architecte dont le niveau de détails sera évalué selon l'outil. (ii) le développement d'une interface peu conviviale pour les utilisateurs. Dans l'ordre, une démarche psycho-cognitive est envisagée permettant de préciser les fonctionnalités essentielles à l'utilisation de l'interface ; puis la question ergonomique sera étudiée en collaboration avec le CO en présence d'ergonomes. **Axe 2** : (i) Le financement indirect des acteurs du bâtiment présente un risque en raison de notre besoin élevé d'instrumentation ; leur appui effectif reposant seulement sur un lien de confiance. (ii) et le temps de calcul pourrait limiter l'accès rapide aux rendus pendant les classes. L'utilisation de terminaux (tels que les tablettes) permettront l'accès aux machines virtuelles. **Axe 3** : Un seul point de vigilance concerne les temps d'exécution de LMDZ a intégré dans "le simulateur" et la dépendance de ce temps aux infrastructures d'exécution. C'est pour ça que ce travail sera engagé très tôt dans le projet. **Axe 4** : Un risque a été identifié et concerne la continuité de la pratique d'observations saisies in situ dans la durée ou la répétition. Comme solution, nous travaillerons avec différents participants (primaires et secondaires) inscrits dans une formation scolaire continue.

3. Organisation et pilotage du projet

3.1. Responsable du projet

La chercheuse, Dr. Marion Carrier (MC), assurera la coordination du projet et sera associée au responsable scientifique, Dr. Frédéric Hourdin. MC a obtenu diverses sources de financement provenant de plusieurs organisations étrangères dans le domaine de la pyrolyse fondamentale. Elle a développé des méthodologies expérimentales permettant la mesure de cinétiques globales et intrinsèques de transformations des systèmes solides réactifs dans des gammes de températures modérées (jusqu'à 600 °C); suscitant ainsi l'intérêt de physiciens sur les aspects de

couplage des physiques entre la cinétique chimique et les phénomènes de transfert et transport^[22]. Depuis 2019, MC s'est initiée aux pratiques de la modélisation par Monte Carlo pour assurer l'élaboration d'une alternative aux approches numériques. Ayant co-dirigé 5 thèses dont 2 sont en cours et 2 chercheuses postdoctorales dans le domaine du Génie des Procédés et de l'Environnement, elle a coordonné différentes opérations (installation d'équipements analytiques et de mesure, modification et instrumentation de réacteurs) en collaboration avec plusieurs technicien.ne.s, ingénieur.e.s de 3 unités de recherche internationales. Ces dix années passées à l'international (Afrique du Sud, Chili, Angleterre) lui ont permis d'acquérir des compétences pour concevoir, diriger, animer, gérer et coordonner des activités de recherche. Résolument convaincue du rôle central des programmes éducatifs^[23], elle s'est naturellement rapprochée du collectif **EDStar** et de leurs pratiques vertueuses d'enseignement et de transmission. En parallèle de son active participation au réseau national des activités portant sur les conversions thermochimiques (co-organisatrice de la première école Valotherbio en 2023 et membre du bureau du GDR Thermobio depuis 2022), elle a aussi évolué dans une communauté internationale MOPGA en tant que lauréate du programme et participé au comité scientifique des conférences MOPGA (2018-2023) et fait partie de l'association Marie Curie Alumni Association. Elle est co-auteurice de 44 articles de rang A (h-index 28, Scopus) avec un niveau d'interdisciplinarité élevé.

Frédéric Hourdin (<https://web.lmd.jussieu.fr/~hourdin/>) est directeur de recherche CNRS au LMD (8 ans directeur adjoint) et co-auteur de 106 publications de rang A (h-index 47). Après des recherches en planétologie (1989-2005), il s'est focalisé sur la modélisation du climat de la Terre. Il coordonne le développement du modèle LMDZ (<https://lmdz.lmd.jussieu.fr/>, 4 à 8 ingénieurs et 5 à 10 chercheurs en continu) labellisé "Service National d'Observation" par l'Insu en 2019 et a contribué à structurer la communauté nationale sur la modélisation physique du climat (avec MétéoFrance notamment) jusqu'à monter le GDR Dephy en 2019. Il est un des principaux orchestrateurs à l'IPSL des simulations CMIP en amont des rapports du Giec, et membre actif du PEPR TRACCS. Il a porté des axes de projets ANR multi-disciplinaires (cf. [Section 1.2](#)). En 2014, il a co-organisé avec T. Mauritsen une conférence sur la calibration (tuning) des modèles de climat (<https://www.wcrp-climate.org/sessions/374-model-tuning>) qui a largement contribué à faire émerger cette question au niveau international. Il est à l'origine de la diffusion rapide de méthodes bayésiennes de calibration basées sur l'utilisation d'émulateurs statistiques qui permettent de tuner les modèles tout en quantifiant l'incertitude paramétrique associée. Convaincu que la réponse aux enjeux de la transition passera par une appropriation large des dimensions scientifiques, il est également fortement investi dans l'enseignement pour et par la modélisation.

3.2. Organisation du partenariat

Le consortium est constitué de 4 laboratoires de recherche en science formelle (**RAPSODEE**, laboratoire de Recherche d'Albi sur les Particules Solides, l'Energie et l'Environnement-UMR 5302; **LMD**-Laboratoire de Météorologie Dynamique-UMR 8539; **CNRM**, Centre national de recherches météorologiques-UMR 3589; **Laplace**, Laboratoire Plasma et Conversion d'Energie-UMR 5213) et de l'unité Mixte de Recherche « Education, Formation, Travail, Savoirs », l'**EFTS** travaillant les questions de sciences humaines et sociales; ces entités sont réparties sous deux tutelles, le **CNRS** et l'**Université Toulouse Jean Jaurès 2** (UTJJ2). Les liens établis au cours de ces 3 dernières décennies a permis la constitution du collectif **EDStar** qui rassemble de nombreuses disciplines des Sciences et Technologies (physique, informatique, sciences pour l'ingénieur), des Sciences de la Vie et de l'Environnement (biologie, comportement animal), et des Sciences Humaines et Sociales (didactique de la physique et des mathématiques) autour de *la pensée en chemins de systèmes complexes*, portée à l'origine par le LAPLACE (Toulouse) et



RAPSODEE (Mines d'Albi) et par l'ESTF (Toulouse) sur la partie didactique. La plateforme EDStar (<http://www.edstar.cnrs.fr/prod/fr>), dédiée à l'analyse et au dimensionnement de systèmes énergétiques, dispose de moyens humains et logiciels lui permettant de modéliser des systèmes multi-physiques et multi-échelles. Le collectif inclut des équipes tournées vers des applicatifs industriels, ainsi que vers l'appropriation collective des questions et des gestes en construction. Cette expérimentation de transmission des Sciences Techniques s'est concrétisée il y a 6 ans via des conférences/[concerts](#)^[24]. Depuis 10 ans, une collaboration avec l'équipe de modélisation du climat du LMD (IPSL/Paris) a conduit à 3 ANRs : HighTune (modélisation du climat et calibration des modèles), MCGRAD (rayonnement atmosphérique) et MC² (couplage ville climat^[17]). Les chercheurs de Météo-France spécialistes de la ville impliqués dans MC² seront partie-prenant du consortium et feront le lien avec les communautés d'urbanistes et d'architectes. Le LMD est également engagé sur les questions d'articulation entre scientifique et politique (ANR ClimaConf avec le centre Koyré). Avec l'ANR MCMET, le collectif s'est récemment élargi au **Centre Scientifique et Technique du Bâtiment** (CSTB) qui développe des solutions pour les villes de demain en promouvant une approche systémique et multidisciplinaire. Leurs projets de construction et de rénovation durable sont adaptés aux usagers et prennent en compte les enjeux sociologiques, économiques, santé et confort, environnement et énergie, et de sécurité. Des questions qui animent aussi les enseignements portés par les enseignants-chercheur.e.s à l'école de l'**IMT Mines Albi** où le parcours 'Bâtiments et villes durables' a trait à la maîtrise de l'énergie dans le domaine de la construction et de la rénovation (thermique du bâtiment) et à la réduction de l'impact des bâtiments sur le climat (construction durable). Le **Centre d'accueil de Saint-Front** situé en Haute-Loire est ancré dans une démarche de transition depuis 1993, et éco-labellisé par l'Union Européenne depuis 2023. Ce lieu accueille notamment des groupes scolaires mais aussi la semaine de résidence annuelle du collectif EDStar. Chaque année, de nouveaux concepts et gestes scientifiques et de nouvelles pratiques de la diffusion des savoirs (éducation populaire) y sont expérimentés. La conférence du jeudi soir est un temps fort du séminaire et de l'interaction avec les habitants du plateau, partant des questions locales du moment (dynamique des populations, isolation des bâtiments, pompe à chaleur...). Cette histoire commune avec EDStar, sa capacité d'accueil et la planification de travaux de rénovation dans les années à venir, en font un lieu privilégié pour l'expérimentation de nos propositions.

L'**Axe 1** sera géré par le **Laplace** (<https://www.meso-star.com/projects/misc/about-en.html>). Cette équipe est le centre névralgique des développements de méthodes autour des physiques en chemin et d'une chaîne d'outils de simulation de systèmes complexe dont le logiciel stardis utilisé entre autres pour simuler la thermique des bâtiments et de la ville. **Stéphane Blanco**, responsable de l'Axe 1, et **Richard Fournier** (Laplace) apporteront leur expertise sur les formulations de l'espace des chemins et les méthodes de Monte Carlo aux questions scientifiques et contribueront également à la transmission des savoirs à un large public. L'**Axe 2** sera coordonné par **Rapsodee** en charge de la caractérisation thermique et des mesures. **Simon Eibner** enseignant sur les thématiques de la thermique du bâtiment et modélisant des transferts de chaleur au moyen des méthodes de Monte Carlo assurera la coordination des travaux d'instrumentation du **CAP**. L'**Axe 3** coordonné au **LMD** par Frédéric Hourdin intègrera dans "Le simulateur" le modèle LMDZ (composante atmosphérique du modèle climatique, IPSL). **Najda Villefranque** (chargée de recherche CNRS au **CNRM**, section interdisciplinaire "Sciences et données" affiliée à **Météo-France**) en collaboration avec **Frédéric Hourdin** assureront les développements relatifs au couplage bâtiments / atmosphère. Enfin, l'**Axe 4** tentera d'objectiver la simulation en rapport à la circulation des savoirs à l'origine des questions de recherche humaine et sociale qui seront



explorées par **Lionel Pélissier (LP)**, didacticien de la physique à l'**EFTS**, en collaboration avec **Mathieu Trosselo**, directeur du **CAP**. Spécialisé dans le domaine de la diffusion des savoirs stabilisés (énergie) dans la société, LP cherchera à comprendre les conditions de possibilité de construction collective de savoirs autour de la simulation en interactions avec plusieurs publics. Ce consortium regroupe des porteurs actifs dans d'autres projets à l'implication raisonnable (Tableau 3).

Tableau 3. Implication des porteur.se.s dans des projets en cours de réalisation.

Chercheur.e	PM	Agence de financement	Titre du projet	Coordinateur.rice scientifique	Début Fin
Blanco S. (Laplace)	6	Région Occitanie	Stardis		jusqu'au 10/24
Carrier M. (Rapsodee)	48	ANR-18-MPGA-0013	PYROKINE	Carrier M.	01/19-03/24
Eibner S. (Rapsodee)	8	PEPR-PAC3R(ANR-22-PERE-0004)	PAC-3R	Martin N.	06/23-05/27
	6	ANR-23-CE46-0002	MCMET	El Hafi M.	02/24-02/28
	6	ANR-21-LCV1-0010	SOLUTEC	Pham Minh D.	10/21-04/26
Hourdin F. (LMD)	16	ANR (ANR-21-CE46-013)	MC ²	Caliot C.	11/21-10/25
	8	PEPR	Traccs	Kageyama M.	01/24-12/31
Pélissier L. (EFTS)	8	Erasmus +	ECOSCOMICS	Association STIMULI (Laurence Bordenave)	07/23-06/25

3.3. Pilotage

Organisation entre partenaires et modalités de pilotage : La mise en place de la gouvernance du projet suivra les modalités d'une microsociété coopérative et participative. Cette forme d'auto-organisation est inspirée des méthodes de travail utilisées par le collectif EDStar depuis plus de 20 ans. Elle s'inscrit suivant trois principes : (1) former les participant.e.s afin qu'ils/elles se projettent en tant que membres à part entière du collectif, 2) maintenir la légitimité du projet dans le réseau de parties-prenantes et 3) développer et/ou adopter les pratiques et outils de gestion populaires. La coordination du projet LAVEC sera assurée par MC depuis Rapsodee pendant les 6 années. Toutes les équipes de recherche seront impliquées grâce au rôle des porteurs de chaque axe qui veilleront à l'état d'avancement des études selon le programme et calendrier ([Section 2.3](#)) et de la responsable du projet qui fera un point avec les porteurs d'axes typiquement deux fois par an. Par ailleurs la plupart des personnes impliquées se retrouvent tous les ans en septembre sur le site de CAP Saint Front, et une réunion plénière du projet sera organisée à chaque lancement d'une version du simulateur. Les outils mis en place permettront de suivre l'avancement du projet et d'assurer la préparation des livrables ; éléments essentiels pour la fourniture, la présentation et la diffusion des comptes-rendus intermédiaires et de fin de projet auprès des représentants administratifs et financiers. La coordinatrice formée à l'utilisation d'outils de gestion utilisera aussi les e-outils du CNRS (MyCore un espace Cloud sécurisé, FileSender pour échanger les gros dossiers).

Mise en place d'un conseil scientifique : Ce comité aura pour rôle d'évaluer nos démarches scientifiques et de les enrichir de leurs compétences. Les conseils et réflexions de **Valéry Masson** et **Robert Shoetter**, reconnus internationalement pour leur contribution dans les domaines du bâtiment et climat urbain, seront primordiales sur la mise en échelle de nos méthodologies au système urbain. **Hélène Guillemot** se propose d'utiliser notre projet comme objet d'étude d'un projet sur l'histoire des sciences de l'environnement en France réunissant sociologues et historiens (cf. [Annexe 4](#), lettre d'intérêt). Enfin **Ludovic Morge** (Directeur de l'INSPE de l'Université de Clermont), **Sébastien Volla** (Formateur SVT à l'INSPE), et **Eric Collard** (Formateur en Physique à l'INSPE), ont exprimé un vif intérêt à rejoindre les didacticiens. Enfin, nous tendons la main à une collaboration élargie. Nos travaux théoriques, de conception de simulateurs et expériences d'enseignement créent un réseau de connaissances partagées, ouvrant la voie à une exploration plus étendue. Nous sommes intéressés à élargir notre cercle, à travailler avec d'autres

pour comprendre selon d'autres points de vue la manière dont circulent les savoirs dans notre collectif.

Echanges avec le comité scientifique du PEPR et les centres opérationnels (CO) : Le projet s'articule avec les CO présents dans le programme, notamment avec le MISCIB que le projet vise très directement à alimenter de nouveaux outils et modèles intégrés et multi-échelles qui pourront être déployés à l'échelle nationale par le CO. Pour cela, les membres du projet maintiendront une correspondance régulière avec MISCIB pour assurer la validité, l'imbrication, l'articulation des modèles physiques et de l'implémentation des approches sociales et humaines proposées et validées par les praticiens de la didactique professionnelle. En particulier, les membres du collectif souhaiteraient explorer et comprendre en quoi leurs pratiques de transmission de savoirs via les chemins à l'occasion de résidence sont efficaces et constitutifs du métier de chercheur.e.s. Le projet s'inscrit également avec le SIVDBI pour les aspects CAO et données climatiques et avec le MESAP pour la mise en œuvre d'outils numériques d'évaluation de politiques urbaines sur le site du CAP. Mathieu Trosselo, directeur du CAP, sera le coordinateur de l'accueil des équipes de recherche, des membres du comité scientifique et des citoyen.ne.s et assurera la communication avec les acteurs locaux. Lui et son équipe assureront l'accueil des membres du CO en collaboration avec Lionel Péliissier pour conduire les entretiens et/ou observations nécessaires aux études anthropologiques.

3.4. Stratégie des établissements

Les institutions auxquelles sont affiliées les chercheurs sont prêtes à investir un temps de travail conséquent (**Tableau 4**) afin d'assurer le bon déroulement du projet LAVEC. De plus ces mêmes institutions qui hébergent les laboratoires mettront à disposition des moyens conséquents et de nombreux outils (cf. les fiches descriptives en [Annexe 5](#)). La communication des résultats du projet LAVEC sera assurée lors de la participation aux conférences/séminaires, via la publication d'articles avec comité de lecture ainsi diffusant les connaissances acquises auprès de domaines scientifiques variés ([Annexe 6](#)). Une plateforme en ligne et médias professionnels seront utilisés pour communiquer sur les activités en cours. L'ensemble de ces actions contribuera à une coordination et une diffusion efficace des résultats du projet dans les communautés européennes et internationales concernées ; et en particulier vers la communauté VBDI comme le confirme une intention très claire du consortium à publier dans le domaine de la construction ([Annexe 6](#)).

Tableau 4. Répartition de temps de travail (Person.month) permanents/non-permanents

Titre de l'axe		Partenaire	PM	Total PM	Début- Fin T
Axe 0	Coordination, animation et gestion du projet	Rapsodee	36	36	1-24
Axe 1	Du dessin des bâtiments à leur mise en donnée pour des calculs thermiques	Laplace	36/80	116	1-24
Axe 2	L'instrumentation et la thermique du bâtiment de Cap Saint-Front	Rapsodee	39/52	91	1-24
Axe 3	La thermique des bâtiments sous un climat changeant	LMD/CNRM	81/74	155	1-24
Axe 4	La circulation des savoirs	EFTS	60/72	132	1-24
				530	

4. Impact et retombées du projet

Résultats attendus et impacts socio-économique-technique-écologique-territorial : Les résultats scientifiques attendus portent sur i) les méthodes en chemins (modélisation des nuages, prise en compte de non linéarité), en physique du climat (nuage/rayonnement, descente d'échelle) et dans la représentation de couplages de systèmes complexes; (ii) les questions de didactique autour de l'utilisation des simulations numériques et de la physique en chemin pour la transmission. Les équipes sont habituées à valoriser les avancées scientifiques fruits de leurs recherches dans des revues scientifiques et ont récemment publié plusieurs articles majeurs dans des revues de renom (Science advances, Siggraph, Plos One). Ceci s'appliquera aux recherches

du LAVEC. Le développement et le déploiement des simulateurs sont au cœur du projet. La massification des expériences de transmission sera assurée au sein du projet LAVEC par la multiplication, répétition de nombreuses situations d'enseignement, via un travail informatique de l'installation automatisée du simulateur sur différentes plateformes. La rédaction de contenus par les animateurs du CAP pour les jeunes publics, avec l'implication des porteurs dans l'enseignement des problématiques climat/énergie à différents niveaux, et en particulier dans la formation des professeurs de lycées seront autant de leviers et de garanties pour y parvenir. Le projet veillera à rendre visible cet aspect circulation des savoirs au travers de ressources pédagogiques destinées aux utilisateurs du simulateur. Cela pourrait donner lieu à une nouvelle démarche d'enseignement voire à des propositions d'ingénieries en replaçant l'intérêt de la simulation au centre des apprentissages. L'idée étant de diffuser ces savoirs académiques vivants à l'extérieur de la communauté scientifique, contribuant ainsi à la formation des citoyen.ne.s présent.e.s et de demain face aux problématiques énergétiques. En termes de retombées **socio-économique-technique-écologique-territorial**, le projet a pour objectif de fournir des outils de simulation et d'appropriation des questions pour aider à rendre effective la transformation des villes et des territoires dans un souci d'atténuation et d'adaptation face au réchauffement global. Le projet pourra venir alimenter les services climatiques portés par le PEPR Traccs auquel contribue la composante climat du consortium.

Stratégie de préparation, diffusion et de valorisation des résultats : (i) Préparation du PGD :

Le projet sera référencé sur OPIDoR ainsi que l'identité de tous les responsables sur ORCID. Des responsables de la gestion des données pour chaque lot et du plan de gestion de données seront désigné.e.s et en charge de la collecte, traitement et stockage. La description de l'ensemble des données seront collectées et archiver sous un format ouvert, non propriétaire, standardisé à partir de la plateforme PAC du CINES. La documentation et métadonnées produites seront rédigées selon les recommandations de DORANum et recherche.data.gouv.fr. Les exigences éthiques seront respectées avec l'anonymisation des données, le renvoi à un comité d'éthique (contact avec le CO) et la signature d'accords de consentement. Les droits de propriété intellectuelle appliqués suivront les politiques de propriété intellectuelle du CNRS et l'UTJJ2 qui seront propriétaires des données. **(ii) Partage des données et pratiques de science ouverte (OS) :** Ce collectif a réuni des mesures dont l'adéquation et la qualité pour favoriser la diffusion et l'exploitation des résultats ne font aucun doute. Pour chaque article emblématique et outil, les principes et pratiques de la science ouverte (OS) et FAIR sont prônées. En vue d'une réutilisation ultérieure par la communauté universitaire, les données de recherche seront également téléchargées dans un entrepôt de confiance tel que Recherche Data Gouv. La publication en libre accès Gold (Gold OA) étant prohibitif, des dispenses de frais pour Gold OA seront demandées. Si le Gold OA reste inabordable, les publications seront mises à disposition en utilisant le Green Open Access (Green OA) qui est conforme aux exigences des deux lois majeures, la Loi pour la République Numérique (janv. 2016) et le décret sur l'exigence de l'intégrité scientifique (décembre 2021). L'ouverture des publications et données sera assurée avec le dépôt du manuscrit accepté (MA) par l'auteur et la version d'enregistrement (VE) sur la plateforme commune d'archivage française HAL, où le MA devient immédiatement disponible et la VE devient disponible après la période d'embargo de l'éditeur. **(iii) Gestion de toutes les données et données ouvertes :** Un lieu de stockage des données sera organisé et préconisé par chaque tutelle: la plateforme collaborative Resana pour le CNRS et le datacenter de l'UFTMiP pour l'Université de Toulouse 3. Ce sont des plateformes sécurisées et dont les sauvegardes sont assurées tous les jours.

5. Justification des moyens demandés

Partenaire 1 – Rapsodee (339.3k€): Equipement (51.7k€) : Kits pour les mesures thermiques (30k€), Caméras IR (10.7k€), boîtier d'acquisition (11k€). Personnel (188.5k€) : 1 thèse (Axe 2 – Tâche 2.3), 36 mois, sur le calage des paramètres thermiques d'un bâtiment "stylisé" par rapport à des mesures de type "coheating", Ingénieur.e (Axe 2 – Tâches 2.1&2.2), 12 mois, appui à l'instrumentation, 2 masters Recherche (Axe 2 – Tâches 2.1&2.2), visualisation des pertes thermiques et mesures/mise en place de la méthode du co-heating. Prestations de service (42k€) : Instrumentation du bâtiment (40 k€) (Axe 2 – Tâche 2.1) Mesure d'infiltrations (2k€) Fonctionnement (57.2k€) : Missions - Réunions d'instrumentation/formation pour 7 personnes (Ingénieur.e.s et Chercheur.e.s) 3 semaines/an pendant 1 an à Saint-Front (16.8 k€) (Axe 2. Tâches 2.1&2), 3 participations à des conférences internationales pour 1 pers. (13.5k€), 6 conférences nationales pour 3 pers. (14.4k€), 1 participation à 1 conférence internationale SHS pour 1 pers. (4.5k€), 1 participation à 1 conférence nationale SHS pour 1 pers. (1k€), déplacements élèves ingénieur.e.s + responsable module énergie (2k€), Autres - Gestion, conservation et diffusion des données (1k€), dépenses pédagogiques (1k€), Machine pilotage des kits (1k€), 2 caméras thermiques grand public (2k€).

Partenaire 2 – LMD (501.3k€): Equipement (40k€) : Station météorologique (40k€). Personnel (422.9k€) : 1 thèse (Axe 3 – Tâche 3.2), 36 mois, projections et incertitudes d'un bâtiment sous un climat en surchauffe, 1 ingénieur.e (Axe 3 – Tâche 3.1), 24 mois, développement d'un simulateur des couplages bâtiment/climat, 1 postdoc (Axe 3.3 – Tâche 3.3), 24 mois, raffinement de la représentation des couplages bâtiments/atmosphère. Prestations de service (0k€), Fonctionnement (38.4k€) : Missions - 3 participations à des conférences internationales pour 1 pers. (13.5k€), 6 conférences nationales pour 3 pers. (14.4k€), 1 participation à 1 conférence internationale SHS pour 1 pers. (4.5k€), 1 participation à 1 conférence nationale SHS pour 1 pers. (1k€), Autres - Machine pilotage de la station (1k€), Gestion, conservation et diffusion des données (1k€), dépenses pédagogiques (1k€), Aménagement emplacement pour réception station météorologique (2k€).

Partenaire 3 – CNRM (130.9k€): Equipement (0k€). Personnel (128.9k€) : 1 thèse (Axe 3 – Tâche 3.3), 36 mois, raffinement de la représentation des couplages bâtiments/atmosphère. Prestations de service (0 k€). Fonctionnement (2k€) : Gestion, conservation et diffusion des données (1k€), dépenses pédagogiques (1k€).

Partenaire 4 – Laplace (572.6k€): Equipement (0k€). Personnel (319.2k€) : 1 postdoc (Axe 1 – Tâche 1.1), 24 mois, sur le développement du logiciel de génération procédurale de géométries 3D, 1 postdoc (Axe 1 – Tâche 1.2), 24 mois, sur le développement du simulateur 3ème génération. Prestations de service (216k€) : Développement démonstrateur CAO du bâtiment, 72 mois (210 k€), Calcul et modèle 3D selon pratique d'architectes (6k€). Fonctionnement (37.4k€) : Missions - 3 participations à des conférences internationales pour 1 pers. (13.5k€), 6 conférences nationales pour 3 pers. (14.4k€), 1 participation à 1 conférence internationale SHS pour 1 pers. (4.5k€), 1 participation à 1 conférence nationale SHS pour 1 pers. (1k€), Autres - Machines pour simulation CAO (2k€), Gestion, conservation et diffusion des données (1k€), dépenses pédagogiques (1k€).

Partenaire 5 – EFTS (431.7k€): Equipement (2k€) : Matériel pour visioconférence (2k€). Personnel (231.5k€) : 1 thèse (Axe 4 – Tâche 4.1), 36 mois, développement du simulateur et place de la simulation numérique dans l'enseignement, 1 thèse (Axe 4 – Tâche 4.2), 36 mois, formulations et visualisation en chemins pour s'approprier la physique. Prestations de service (116.6k€) : 1 chargé.e de mission, 18 mois, pour l'animation ateliers avec primaires (66.6k€), Location des locaux (50k€). Fonctionnement (81.6k€) : Missions - 3 participations à des

conférences internationales pour 1 pers. (13.5 k€), Réunions pédagogiques nationales pour 3 personnes (3k€), Prolongation de séjours découvertes de 3 à 5 jours (48.8k€), Autres - Tablettes numériques pour primaires (8.3 k€), Gestion, conservation et diffusion des données (4k€), dépenses pédagogiques (4 k€).

6. Cited references / Références bibliographiques citées

- [1] G. Guyon, « Role of the model user in results obtained from simulation software program », *Build. Simul.*, n° 5, p. 377-384, 1997.
- [2] J. Goffart, « Impact de la variabilité des données météorologiques sur une maison basse consommation. Application des analyses de sensibilité pour les entrées temporelles. », 2013. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2013GRENA029/document>
- [3] A. Machard, C. Inard, J.-M. Alessandrini, C. Pelé, et J. Ribéron, « A Methodology for Assembling Future Weather Files Including Heatwaves for Building Thermal Simulations from the European Coordinated Regional Downscaling Experiment (EURO-CORDEX) Climate Data », *Energies*, vol. 13, n° 13, 2020, doi: 10.3390/en13133424.
- [4] J. M. Gutiérrez *et al.*, « The Future scientific challenges for CORDEX: Empirical Statistical Downscaling (ESD) », 2022.
- [5] T. De Jong, E. Martin, J.-M. Zamarro, F. Esquembre, J. Swaak, et W. R. Van Joolingen, « The integration of computer simulation and learning support: An example from the physics domain of collisions », *J. Res. Sci. Teach.*, vol. 36, n° 5, p. 597-615, mai 1999, doi: 10.1002/(SICI)1098-2736(199905)36:5<597::AID-TEA6>3.0.CO;2-6.
- [6] N. Villefranque *et al.*, « The “teapot in a city”: A paradigm shift in urban climate modeling », *Sci. Adv.*, vol. 8, n° 27, p. eabp8934, juill. 2022, doi: 10.1126/sciadv.abp8934.
- [7] J. M. Tregan *et al.*, « Coupling radiative, conductive and convective heat-transfers in a single Monte Carlo algorithm: A general theoretical framework for linear situations », *PLOS ONE*, vol. 18, n° 4, p. e0283681, avr. 2023, doi: 10.1371/journal.pone.0283681.
- [8] M. Bati *et al.*, « Coupling Conduction, Convection and Radiative Transfer in a Single Path-Space: Application to Infrared Rendering », *ACM Trans. Graph.*, vol. 42, n° 4, p. 1-20, août 2023, doi: 10.1145/3592121.
- [9] F. Hourdin, B. Ferster, J. Deshayes, J. Mignot, I. Musat, et D. Williamson, « Toward machine-assisted tuning avoiding the underestimation of uncertainty in climate change projections », *Sci. Adv.*, vol. 9, n° 29, p. eadf2758, doi: 10.1126/sciadv.adf2758.
- [10] R. Bonnet *et al.*, « Increased risk of near term global warming due to a recent AMOC weakening », *Nat. Commun.*, vol. 12, n° 1, p. 6108, oct. 2021, doi: 10.1038/s41467-021-26370-0.
- [11] F. Hourdin *et al.*, « The Art and Science of Climate Model Tuning », *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 98, n° 3, p. 589-602, mars 2017, doi: 10.1175/BAMS-D-15-00135.1.
- [12] F. Hourdin, B. Ferster, J. Deshayes, J. Mignot, I. Musat, et D. Williamson, « Toward machine-assisted tuning avoiding the underestimation of uncertainty in climate change projections », *Sci. Adv.*, vol. 9, n° 29, p. eadf2758, juill. 2023, doi: 10.1126/sciadv.adf2758.
- [13] <https://anr.fr/Projet-ANR-10-CEPL-0003>.
- [14] <https://anr.fr/Projet-ANR-10-CEPL-0005>.
- [15] <https://anr.fr/Projet-ANR-13-SENV-0007>.
- [16] F. Hourdin et H. Guillemot, « Modélisation du climat », *Encycl. Universalis*, p. 1-21, 2021.
- [17] <https://anr.fr/Projet-ANR-21-CE46-0013>.
- [18] L. Pelissier et P. Venturini, « Analyse praxéologique de l'enseignement de l'épistémologie de la physique: lecas de la notion de modèle », *Educ. Didact.*, vol. 10, n° 2, p. 63-90, 2016.
- [19] M. Coquidé-Cantor et J.-F. Le Maréchal, « Introduction. Modélisation et simulation dans l'enseignement scientifique : usages et impacts », *Aster*, vol. 43, n° 1, p. 7-16, 2006, doi: 10.4267/2042/16799.
- [20] P. Pastré, *La didactique professionnelle*. Presses Universitaires de France, 2011. doi: 10.3917/puf.faber.2011.01.
- [21] G. Bauwens et S. Roels, « Co-heating test: A state-of-the-art », *Energy Build.*, vol. 82, p. 163-172, oct. 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.04.039.
- [22] Y. Nyffenegger-Péré, M. Carrier, S. Eibner, M. El Hafi, M. Nasfi, et A. Sahim, « A Monte Carlo-Based Strategy to Assess Complex Kinetics: Application of the Null-Reaction Method to DAEM », *J. Phys. Chem. A*, vol. 127, n° 8, p. 1988-1997, mars 2023, doi: 10.1021/acs.jpca.2c06893.
- [23] J. Lamb, M. Carrier, et J. Lamb, « Learning-Centred Educational Development: An Approach That Draws upon Creative Arts and Philosophies of Emancipation », in *Learning-Centred Curriculum Design*, Libri Publishing., 2017, p. 121-149.



[24] <https://www.youtube.com/watch?v=pVUsp-S6jlk>.

7. Linked projects

CLE EDSTAR (2016): Le Laplace en collaboration avec Mésio-Star ont développé respectivement le démonstrateur 2D et le Star Engine (qui est regroupe de librairies).

Projet DIDES (EFTS / EDStar) (2020-2021): Mise en place d'une recherche collaborative afin d'initier un travail de conception, d'implémentation et analyse d'ingénieries didactiques en lycée général et professionnel pour diffuser à grande échelle l'apprentissage des savoirs liés à l'énergie via une approche statistique.

ReadyNov (Laplace / Mésio-Star) (2021-2022): est un projet de la région Occitanie impliquant les partenaires |Mésio|Star> et le LAPLACE. L'objectif de ce projet était de développer des outils de démonstration de Stardis afin de convaincre de nouveaux acteurs industriels d'adhérer au consortium et ainsi d'accroître ses ressources.

ANR MC² (LMAP / CNRM / LMD) (2021-2025): Modélisation du climat urbain avec une partie calcul de référence à haute résolution. Couplage mécanique des fluides par LES / thermique par Monte Carlo, CNRM) et une partie simulation du climat urbain sous la colonne d'un modèle de climat (LMD). Son premier axe de recherche consiste à coupler des simulations de référence de mécanique des fluides à haute résolution tenant compte des obstacles que constituent les bâtiments, avec une simulation des transferts thermiques au sein des bâtiments à l'aide du logiciel Stardis.

ANR MCMET (RAPSOEE / CNRM / Institut Pascal /LEMTA) (2024-2028): MCMET a pour objectif de développer une stratégie unique pour simuler des systèmes énergétiques complexes en s'appuyant sur les progrès récents des méthodes d'échantillonnage en espaces de chemins par Monte Carlo.

PEPR Traccs (LSCE / CNRM / CEA / IRD / CERFACS / Université Grenoble Alpes / Sorbonne Université / Université Paris-Saclay / Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines) (2024-2031): compréhension et simulation des changements climatiques et de leurs impacts ; élaboration de prototypes de services climatiques co-construits par les parties-prenantes et les experts en modélisation du climat en vue d'accélérer l'action climatique, que ce soit pour l'atténuation ou l'adaptation.

8. CV du responsable du projet

Personal details/Identité					
Gender	Female				
Name and first name/Nom et prénom	Carrier Marion				
Country/Pays	France				
Current position					
Function	CNRS Research Scientist				
French public organisation					
Code RNSR	Organisation	Laboratory	Unit code	Postcode	Town
201220448D	CNRS	RAPSOEE	UMR-5302	81013	Albi
Other activities :					
<p>Services: Member of Société Chimique de France and Société Française de Génie des Procédés (France) and Royal Society of Chemistry (England) (since 2019) / Board member since 2023 and member of the Groupement de Recherche (since 2018) Thermo-Bio (France) / Fellow of the Higher Education Academy (UK) (since 2017)/ Member, Research Network "South African Research Staff Association for Postdocs" and acted as NRF (National Research Foundation) and SARSA-PD representative at the Euroscience Open Forum 2012 in Ireland to represent South Africa (2011-2012) /Secretary of the Postdoctoral Society at Stellenbosch University (2012)/ Chair of a 300-person non-profit student organization during her PhD (2006). Commitment in scientific events: Co-organizer of the Thematic School « Valorisation thermochimique de la biomasse et des déchets: caractérisation, procédés et filières - VALOTHERBIO», co-funded by the French Council of Scientific Research (CNRS) – 70 expected participants (02-06/10/2023) / Participation to the organizing and scientific committees of the MOPGA conferences in Strasbourg and Berlin (2021-2022) / Organizer of the Postgraduate Research Symposium, Stellenbosch University, Process Engineering Department, South Africa - 50 participants and of 44 presentations (23-24/05/2013). Organizer of the 1st South African workshop entitled 'From Biomass to Bioenergy via thermochemical processes' organized in collaboration with Aston and Cranfield Universities and sponsored by the Engineering and Physical Sciences Research Council. 65 participants and 21 oral presentations (22-23/10/2012). Scientific reviewing activities: Expert for the Ministère de l'Europe et des Affaires étrangères (2020-2023, France), ANR Bioeconomy call (2020-2022, France); H2020 Energy calls (2016-2019, Belgium); MSCA-IF- (2018/2020/2023, Belgium), fwo-Bioeconomy Impulse Programme (2021, Belgium); Fondecyt (2019, Chile) and NRF rating (2019/2021/2022, South Africa)/ 2010-Present: Evaluator of MSc thesis, Pretoria University & North-West University (South Africa); Expert invited as examiner at the PhD thesis of: Dr.W. de Rezedo Locatell (2022, UCBLyon University), Dr. Federica Nardella (2022, Pisa University), Adriana Estrada (2023, Ghent University), Axel Curcio (2023, Odeillo) / Reviewer for the following ISI journals: Applied Energy, Energy Conversion and Management, Energy & Environmental Science, Cellulose, Industrial & Engineering Chemistry, ChemSusChem, Engineering Science and Technology, Environmental Science and Technology, RSC Advances, and 9 others.</p>					
Pedagogical and administrative responsibility					



Elected representative of Lecturers/Researchers on the UMR strategy Committee of RAPSODEE (since 2020) and on the Research committee of IMT Mines Albi (since 2020) / **Responsible for scientific and technical information** of RAPSODEE (since 2020) / **Representative** of the Engineering and Applied Science (EAS) Research Fellows on the **Research Strategy Committee** of the EAS School (2016-2017) / **Teaching:** Assistant lecturer for practicals (20h, France) – Heat transfer and Energy Balance & France Energy Scenarios (2022-2023) / Participation to the **Posgraduate Certificate programme in Learning and Teaching in Higher Education**, Aston University (60 credits-100 hours). **Assistant lecturer for tutorials** - CE1009 Introduction to Transfer Process Mass and Energy Balance (8h, England) / Assistant lecturer – Participation in the organization and implementation of a Bioenergy course (10h course and practicals, SouthAfrica) - Thermochemical processes and tutorials (2009) / Assistant lecturer – Chemistry and Applied Environmental Processes – Analytical Sciences CPE Lyon (204h, 2006-2007, France).

Previous positions

Function

Start date	End date	Town	Organisation	Function
Oct. 2018	Present	Albi, France	RAPSODEE, IMT Mines Albi-Carmaux	CNRS Research Scientist
Feb. 2018	Jan. 2019	Birmingham, England	School of Engineering & Applied Science, Aston University	Honorary Research Fellow
Oct. 2015	Jan. 2018	Birmingham, England	Bioenergy group, EBRI, Aston University	Marie-Curie Researcher w
March 2014	August 2015	Concepción, Chile	UDTecnológico - University of Concepción	Research Scientist
Dec. 2008	Nov. 2013	South-Africa	Dept. of Process Engineering, Stellenbosch Univ.	Postdoctoral fellow
Dec. 2007	Nov. 2008	Bordeaux (France)	ICMCB UMR 5026	Postdoctoral fellow

Education

Dec. 2015 - Dec. 2016: **Postgraduate Certificate** in Learning and Teaching in Higher Education (PGCert), Aston University, UK.
 Sept. 2004 - Sept. 2007: **PhD in Chemistry** with Honours distinction, Institute of Research in Catalysis-National Research Council (IRCELyon) UMR 5256, University of Claude Bernard, France.
 Sept. 2003 - June 2004: **MSc in Strategies and Analytical Sciences** with distinction, at LACE (Laboratoire d'Application de la Chimie à l'Environnement), University of Claude Bernard, France.
 Sept 2001- June 2004: **Engineer diploma in Chemistry and Processes Engineering** at CPE LYON, France.

Awards, grants

2018-23: 'Make our planet great again' 5-years [PYROKINE](#) project awarded by the French government - [Biomass fast pyrolysis: A ¹³C dual kinetic approach](#) / 2015-18: **Intra Marie-Curie Individual fellowship – Horizon 2020, PYROCHEM**, awarded by the European commission / 2014-16: **Applied R&D project** 'Linea 2: Proyecto de I + D aplicada' entitled: 'Obtención de compuestos aromáticos de interés comercial a partir de corteza de pino radiata' awarded by Corporación de Fomento de la Producción (CORFO)/2013: Award **Y-rated promising young researcher** by the National Research Foundation / 2010-12: **Innovation postdoctoral Fellowship** awarded by the National Research Foundation - Co-pyrolysis and co-gasification kinetic studies /2004-07: PhD Scholarship awarded by **BDI-CNRS** (Bourse de l'Ingénieur-French national Center for Scientific Research)

Scientific productions

5 publications

What is the major contribution of this publication

1	M. Carrier, M. Windt, B. Ziegler, J. Appelt, B. Saake, D. Meier, and A. Bridgwater, 'Quantitative Insights into the Fast Pyrolysis of Extracted Cellulose, Hemicelluloses, and Lignin', <i>ChemSusChem</i> , vol. 10, no. 16, pp. 3212–3224, 2017.	Analytical observations: A 10-year based experimental experience on rationalizing main thermal degradation pathways of lignocellulosic biomasses led to a successful implementation of a novel spectrometric method (NMR) and materials enriched with Carbon 13 to characterize fast pyrolysis bio-oils.
2	Lumped chemical kinetic modelling of raw and torrefied biomass under pressurized pyrolysis, Gouws, S.M., Carrier, M., Bunt, J.R., Neomagus, H.W.J.P., <i>Energy Conversion and Management</i> , 2022, 253, 115199	Numerical approaches for chemical kinetics: The model is based on an adjustable mechanistic reaction scheme, which includes a combination of three different sub-mechanisms for primary and secondary pyrolysis.
3	- A Monte-Carlo Based Strategy to Assess Complex Kinetics: Application of the Null-Reaction Method to DAEM, Nyffenegger-Péré, Y.; Carrier, M.; Eibner, S.; El Hafi, M.; Nasfi, M.J.; Sahim, A., <i>The Journal of Physical Chemistry Part A</i> , 2023, 127(8), 1988–1997.	Statistical approach for chemical kinetics: A new concept of null reaction, inspired from null-event Monte Carlo algorithms, to describe the temperature dependence of reactions under dynamic conditions.
4	- Kinetic modelling of biomass fast devolatilization using Py-MS: Model-free and model-based approaches, Nasfi M., Carrier M., Salvador S., <i>Journal of Analytical and Applied Pyrolysis</i> , 2023, 174, 106128.	Heat and kinetic modelling: We compared different global methods, model-free and model-fitting, to model kinetics of the wood fast pyrolysis. A downward coupling between chemical kinetics and the heat transfer model was used.
5	Review 'Global change crisis requires breaking the silo barriers between disciplines: the Franco-German "Make Our Planet Great Again" (MOPGA) initiative' written by all the MOPGA's laureates and submitted to PNAS.	The review summarizes the salient findings across a variety of approaches represented in the MOPGA group. We discuss the crosstalk that developed among the different disciplines and next steps to achieve a truly multi-disciplinary approach to tackle the multifaceted challenges of global change.

Source code

Brief description/Description succincte

1	https://gitlab.com/yannisnp/DAEM_MC DAEM_MC is free software released under the GPL v3+ license: GNU GPL version 3 or later.	DAEM_MC is a Monte-Carlo estimator of the reaction rate based on the DAEM (Distributed Activation Energy Model). The project aims to reproduce the results of the article: A Monte-Carlo Based Strategy to Assess Complex Kinetics: Application of the Null-Reaction Method to DAEM"
---	---	--

Appendix section

Annexe 1. Liste des acronymes

ACM-TOG: Association for Computing Machinery - Transactions on Graphics
 AFNOR : Association Française de Normalisation
 ANR : Agence nationale de la recherche
 CAO : Conception Assistée par Ordinateur
 CAP : Centre d'Accueil Polyvalent
 CMIP: Coupled Model Intercomparison Projects
 CO: Centre opérationnel
 CORDEX: Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment
 CSTB : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
 EDF : Electricité de France
 EDStar :
 EFTS: Education, Formation, Travail, Savoirs
 GDR: Groupement de Recherche
 GIEC: Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
 GNU: GNU is a recursive acronym for "GNU's Not Unix!"
 GPL : General Public License
 INSPE : Institut National Supérieur du Professorat et de l'Education
 IPSL: Institut Pierre-Simon Laplace
 LMDZ : Laboratoire de Météorologie Dynamique Zoom
 MESAP : Méthodes d'évaluation des Scénarios d'Action Publique
 MISCIB : Modelling Initiative for Sustainable City and Innovative Buildings
 MOPGA : Make Our Planet Great Again
 OPIDoR : Optimiser le Partage et l'Interopérabilité des Données de la Recherche.
 PEPR : Programme et Equipements Prioritaires de Recherche
 PGD : Plan de Gestion des données
 SIGGRAPH : Special Interest Group on Computer GRAPHics
 SIVDBI : Système d'Information pour la Ville Durable et le Bâtiment Innovant
 STD: Simulation Thermique Dynamique
 STEP: STandard for the Exchange of Product
 STS : Science and Technology studies
 Th-BCE: Méthode de calcul réglementaire des Besoins énergétiques, des Consommations énergétiques et du confort d'Été
 TRACCS : TRAnsformer la modélisation du Climat pour les services Climatiques
 VBDI: Ville Durable et Bâtiments Innovants

Annexe 2. Démonstration du simulateur thermique 2D

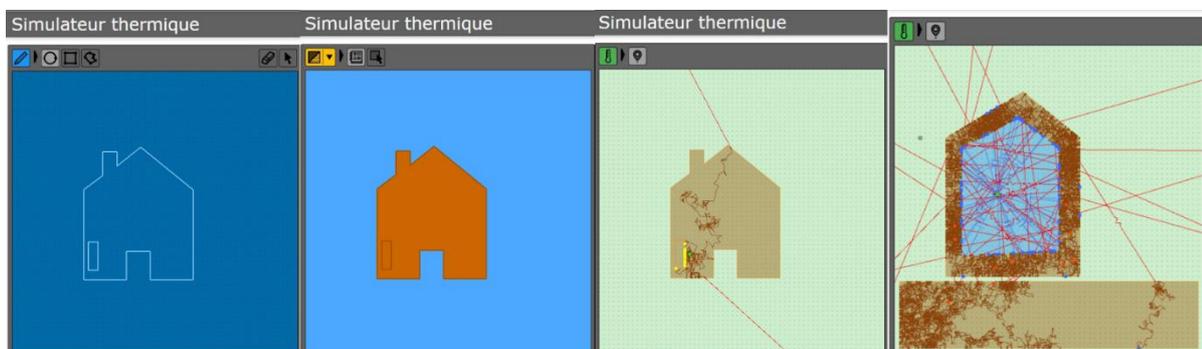


Figure A. Potentialité du simulateur thermique 2D aujourd'hui : a) Géométrie, b) Paramétrage et définition des propriétés thermiques du solide (orange) et du fluide (bleu), c) 1^{ère} expérience - démonstration réalisée par une inexpérimentée pour une maison. d) 2^{ème} expérience : Ajout du sol et de l'isolation. Dans les deux cas, quelques chemins sont représentés pour calculer la température au point vert. Le poids de ces chemins peut être la température du radiateur (points jaune), la température initiale (points oranges pour un solide ou

bleus pour un fluide) ou une température radiative (chemins rouges). Les chemins marrons sont des chemins "conductifs" et les chemins rouges sont "radiatifs". Le simulateur thermique 2D est accessible ici: <http://www.edstar.cnrs.fr/prod/fr/training/tool/therm/>

Annexe 3. Le générateur procédural City_generator2 et ses limitations

Un premier générateur procédural de ville avait été développé pour la production d'images visibles comme celles du film réalisé par le collectif d'une plongée sur une ville au travers d'une couche de cumulus simulée par simulation "des grands tourbillons" en accompagnement d'un article dans "Science Advances" (https://web.lmd.jussieu.fr/~nvillefranque/pages/teapot_city). Mais la donnée générée pour ces images n'était pas "conforme". Ceci a conduit au développement du city_generator2. La conformité des maillages correspond au fait que les triangles des différents bâtiments et parties de bâtiments qui sont en contact doivent se superposer parfaitement, ce qui impose de coordonner l'étape de maillage à l'échelle de l'ensemble des géométries à mailler. Pour l'instant, le city_generator2, à l'état de preuve de concept, reste un outil interne aux équipes du collectif et plusieurs développements significatifs sont nécessaires pour satisfaire à l'ambition du projet de faire d'un jeu d'enfant la construction d'une géométrie par des non spécialistes, pertinente pour éclairer les choix de rénovation et permettre l'appropriation des concepts : ajout de fonctionnalités (sol non plat, arbres, couplage avec la météorologie, nuages, ...), le développement d'une interface permettant de dessiner et contrôler la construction du bâtiment de manière ludique et informative, et enfin l'écriture d'une interface plus complète en termes de structure des bâtiments interfacée avec les outils du monde de l'architecture et du bâtiment.

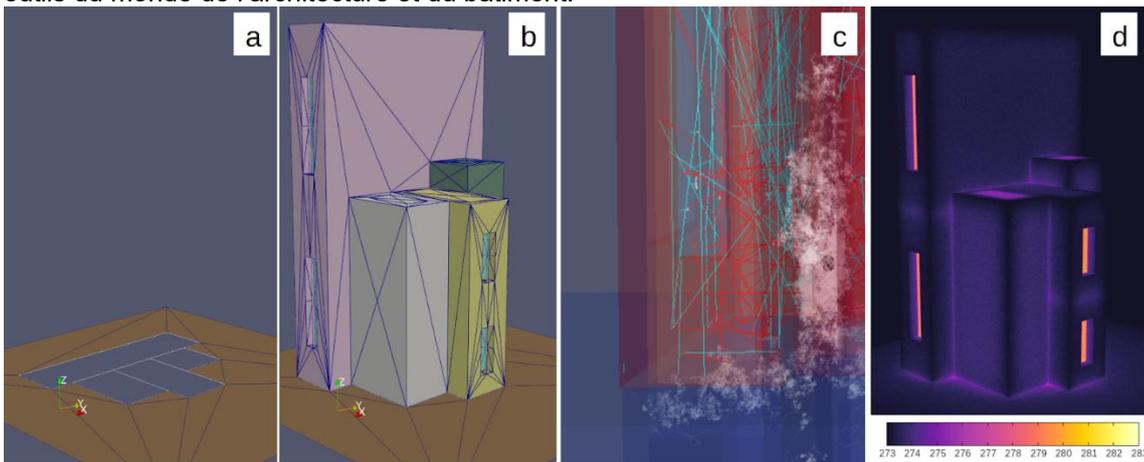


Figure B: Passage d'un plan cadastral à une image de synthèse infrarouge.

A partir du contour au sol d'un bâtiment ou d'un ensemble de bâtiments (a), les bâtiments pouvant être mitoyens ou non, le logiciel city_generator2 utilise ce contour et un ensemble de règles regroupées dans un "mode de construction" pour produire une géométrie 3D conforme (b). Le logiciel stardis prend cette géométrie décorée avec des propriétés thermophysiques et réalise un calcul thermique en espace de chemins (c, en rouge le rayonnement, en blanc la conduction, en bleu la convection). Un résultat possible est une image infrarouge de la scène (d) où chaque pixel est un calcul Monte Carlo (avec l'échelle de température de brillance).

Annexe 4. Lettre (s) de soutien

D'Hélène GUILLEMOT,

Le projet LAVEC est d'un grand intérêt d'un point de vue d'histoire et de sociologie des sciences, comme un exemple d'évolution de la recherche dans la perspective du changement climatique. En tant qu'historienne des sciences (chercheuse CNRS) au Centre Alexandre Koyré (CNRS – EHESS), j'envisage de prendre le projet LAVEC comme terrain pour le projet DySEF d'histoire de l'environnement en France auquel je participe. Le projet DySEF, financé par le CNES et coordonné par Morgan Jouvenet (Dr, CNRS, sociologue), vise à étudier les dynamiques des



sciences de l'environnement en France de 1945 à aujourd'hui. Il réunit une dizaine de chercheurs en histoire, sociologie, géographie et philosophie des sciences qui étudient comment diverses spécialités, productrices de savoirs d'alerte qui ont nourri les préoccupations environnementales depuis les années 1960, ont évolué depuis plusieurs décennies.

Dans ce cadre, nous nous intéressons notamment à la façon dont le problème climatique contribue à transformer ou orienter les sciences du climat. L'alerte lancée par les climatologues étant désormais reconnue, ce sont les conséquences du changement climatique, les « solutions », la « transition », sa mise en oeuvre, l'action politique qui focalisent l'attention, posant d'autres questions et sollicitant d'autres disciplines scientifiques. Comment les sciences du climat renouvellent-elles leurs priorités, leurs problématiques et leurs motivations dans ces contextes en évolution ?

Le projet LAVEC semble un cas d'étude particulièrement pertinent dans cette perspective. Très original en particulier par les collaborations qu'il réunit, sa thématique – la rénovation thermique des bâtiments – est d'une importance pratique, politique et climatique évidente. En couplant des domaines scientifiques de portée globale et locale, il mobilise des sciences et des technologies de pointe et propose des approches nouvelles. Or ces collaborations interdisciplinaires, loin d'être un arrangement de circonstance, poursuivent une histoire déjà longue qu'il faudra analyser. Ce projet relève aussi des « services climatiques », que les scientifiques du climat cherchent à promouvoir - non sans difficultés - pour mettre leurs connaissances au service de la société. En outre il constitue une forme originale d'« engagement », autre sujet d'interrogation chez les climatologues - et d'étude pour les SHS : le projet affirme en effet des engagements à la fois épistémiques et politiques forts, en particulier dans sa dimension didactique et de science participative. Il serait intéressant d'analyser le travail des acteurs pour aligner des préoccupations d'ordres aussi divers.

Ayant travaillé depuis une vingtaine d'années sur les sciences du climat et les relations entre sciences, expertise et politique dans la question du changement climatique, notamment sur la modélisation du climat au LMD, je pourrais, en poursuivant cette enquête, tenter d'identifier à quelques années de distance des transformations mais aussi des rémanences, des héritages historiques, des cultures de laboratoire ou des spécificités institutionnelles.

Hélène GUILLEMOT,

Annexe 5. Fiches descriptives des moyens

Partenaire - RAPSODEE	
Description générale	Le Centre de Recherche d'Albi sur les Particules Solides, l'Energie et l'Environnement (RAPSODEE, UMR CNRS 5302) est un centre de recherche et de formation, un laboratoire reconnu internationalement dans les domaines des procédés énergétiques. Au regard des opérations et procédés étudiés, les enjeux majeurs sont (i) le développement de modèles déterministes à partir d'expérimentations menées à différentes échelles ; (ii) le développement de modèles de données, collectées sur des pilotes ou des procédés industriels, pour le contrôle optimal de ceux-ci par apprentissage profond ; et (iii) la mise en oeuvre (voire combinaison) de méthodes numériques couplées pour la résolution de ces modèles (DEM, FEM, méthodes numériques stochastiques comme les chaînes de Markov et les méthodes de Monte Carlo, etc.). RAPSODEE développe aussi des prototypes expérimentaux et a une solide expérience en métrologie/instrumentation. RAPSODEE est une unité mixte de Recherche CNRS (UMR 5302).
Rôle et contribution des chercheurs.ses	Dr. Marion Carrier : Coordinatrice du projet LAVEC (Voir Section 8); Dr. Simon Eibner : Porteur de l'Axe 2 (Voir CV en Annexe 1); Prof. Mouna El-Hafi enseigne dans le domaine du transfert de Chaleur par Rayonnement et est une experte internationale des techniques de Monte Carlo ; Dr. Laurent Guerby est informaticien et s'occupe de récolter les données des capteurs pour un accès à distance ; Mickaël Ribeiro est technicien et conçoit des pilotes expérimentaux ; Denis Marty est ingénieur de recherche avec une expertise sur la métrologie
Principales installations, infrastructures et équipements de recherche	RAPSODEE a une maîtrise des langages de programmation (C, C++, fortran, python, matlab) et accès à des logiciels (Chemkin, Lexic, Mt. Data, Labview, FactSage, Aspen, Prosim) et contribue au développement de logiciels libres en thermique et en rayonnement (stardis, solstice...). RAPSODEE a un accès partagé à un serveur de calcul à IMT Mines Albi (56 processeurs). RAPSODEE forme des ingénieurs en thermique du bâtiment (parcours Bâtiments et villes durables et Mastère spécialisé Bâtiment à énergie positive).



Partenaire - LAPLACE	
Description générale	Le Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie est une Unité Mixte de Recherche du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), de l'Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT) et de l'Université Toulouse 3-Paul Sabatier (UPS) (UMR 5213, + de 300 permanents et contractuel, 10000 m ² de locaux, 110 Projets en cours). Le Laplace revendique son appartenance à l'Université Fédérale Toulouse Midi-Pyrénées (UFTMiP) et participe à toutes les actions visant à la définition d'une stratégie scientifique du site associant Universités, écoles d'Ingénieurs et organismes de recherche sur un périmètre « Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes ». Les recherches menées au Laplace, allant de l'étude des mécanismes physiques de conversion d'énergie jusqu'aux systèmes qui les mettent en œuvre, se situent au cœur des questions de la transition énergétique de notre société. Le Groupe GREPHE qui se compose d'une 40 aine de personnes a développé une forte expertise dans la modélisation et la simulation des plasmas-hors-équilibre, des phénomènes de transfert radiatif et de la physique des transferts thermique : modèles particuliers, fluides et hybrides en physique des plasmas, méthodes de Monte Carlo, formulation intégrale de l'équation de Boltzmann, etc.. Cette équipe joue un rôle actif dans le développement du collectif Edstar depuis plus de 20 ans.
Rôle et contribution des chercheurs.ses	Stéphane Blanco : responsable de l'axe 1 (voir CV en Annexe 7). Richard Fournier participera à tous les développements de l'axe 1 en lien avec la dimension informatique et physique. Les deux enseignants-chercheurs impliqués dans ce projet seront également associés à des expérimentations utilisant le simulateur en situation d'enseignement ou en situation d'immersion avec un public non nécessairement scientifique.
Principales installations, infrastructures et équipements de recherche	Le laboratoire dispose d'équipements de pointe et abrite des plates-formes reconnues (Hydrogène,...) et des plates-formes mutualisées (plate-forme de 3DPHI) lui permettant de couvrir une approche allant du concept jusqu'au démonstrateur. La politique scientifique du laboratoire s'appuie également sur la définition et le développement d'actions transversales qui constituent un outil majeur pour l'intégration du projet scientifique de l'unité. L'entreprise Meso-Star qui porte la pérennisation des bibliothèques informatiques est hébergé depuis 8 ans par le LAPLACE avec un contrat de partenariat qui stipule la mise à disposition d'un support ingénieur de recherche pour le groupe.

Partenaire - LMD	
Description générale	Le Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD, UMR 8539, ~200 personnels permanents et non permanents) est affilié à la fédération IPSL (Institut Pierre Simon Laplace, ~1000 personnels) qui regroupe en région Parisienne les recherche en sciences du climat et de l'environnement. L'équipe EMC3 dans laquelle est développé le modèle LMDZ est constitué d'une 60 aine de personnels permanents et non permanents, qui mènent des recherches en modélisation du climat. Le modèle LMDZ lui-même est la composante du modèle couplé IPSL-CM utilisé pour les projections du changement climatique. Les recherches du groupe portent plus particulièrement sur 1) la représentation des processus nuageux, convectifs et radiatifs, 2) l'amélioration des simulations climatiques au regards des différents types d'observation (satellites, in situ sur site, campagnes de terrain), 3) la quantification des incertitudes sur les projections climatiques. L'équipe entretient historiquement un lien étroit avec MétéoFrance et avec le collectif Edstar avec lequel elle a monté l'ANR MC2.
Rôle et contribution des chercheurs.ses	Dr. Frédéric Hourdin : Co-coordonateur du projet LAVEC et responsable de l'Axe 4 (Voir Section 8) est responsable scientifique du modèle LMDZ ; Dr. Laurent Fairhead : Responsable technique du projet LMDZ pilotera le travail informatique nécessaire à l'intégration de LMDZ dans « le simulateur » Dr. Jean-Baptiste Madeleine contribuera à ce développement et mènera des expérimentations de l'emploi simulateur en situations d'enseignement Le projet s'appuiera sur les personnels techniques de l'équipe et les volets d'amélioration du modèle (Axe 3) seront menés en lien étroit avec d'autres recherches connexes de l'équipe.
Principales installations, infrastructures et équipements de recherche	Le LMD porte le développement de LMDZ, labellisé outil national (SNO) par l'Insu (CNRS). L'équipe dispose d'un accès direct à un cluster de calcul et de stockage géré localement au niveau de la fédération IPSL et d'un accès privilégié aux centres de calculs HPC français (gérées par Genci) et d'un support ingénieur significatif, tant pour le développement des modèles et la mise en œuvre de simulations que pour le réseau informatique et les moyens matériels de travail. Elle porte aussi une culture de développement logiciel et de logiciel libres.

Partenaire – EFTS - Education, Formation, Travail, Savoirs	
Description générale	L'unité Mixte de Recherche, UMR EFTS, est sous la tutelle de l'Université Toulouse Jean Jaurès et de l'École Nationale Supérieure de Formation de l'Enseignement Agricole. Elle comprend 55 membres statutaires, 99 chercheurs partenaires et 73 doctorants. L'UMR EFTS fédère l'ensemble des chercheurs en éducation de l'Université de Toulouse autour de problématiques de recherches spécifiques et complémentaires relatives aux processus d'éducation et de formation, au vécu et à la mise en œuvre du travail, à l'organisation et la diffusion des savoirs. Elles ont été développées en étroite relation avec les milieux scolaires, professionnels et de formation (secteurs de la santé, du travail social, de l'animation en particulier) autour de trois visées principales : (i) la production de connaissances relatives au champ scientifique de l'Unité. Elle convoque une pluralité de regards, d'approches et d'échelles qu'elle s'applique à articuler entre eux; (ii) le développement de méthodes, démarches ou dispositifs permettant d'investiguer les processus évoqués précédemment, méthodes qui sont formalisées, discutées et théorisées;-l'intervention dans l'accompagnement du changement en relation avec les demandes sociales.

	Le thème 1 « Genèse des savoirs dans les institutions didactiques et apprentissages », le plus important de l'Unité réunit les chercheurs (dont ceux qui sont impliqués dans le projet LAVEC) qui travaillent plus spécifiquement : (i) sur les processus de production, construction, structuration, appropriation et circulation des savoirs dans les institutions à visée d'éducation et de formation ; -sur la diversité des espaces et des acteurs impliqués : dans / hors l'école, à différents niveaux d'un cursus de formation (depuis le cycle 2 jusqu'aux études supérieures), dans différents espaces de formation (enseignement général / professionnel ; formation professionnelle, dont la formation au métier d'enseignant) ; (ii) sur le rôle du langage dans la construction, l'appropriation et la diffusion des savoirs et des problèmes, y compris ceux relatifs aux questions socio-scientifiques.
Rôle et contribution des chercheurs.ses	Lionel Pélissier : responsable de l'Axe 4 (cf. CV Annexe 7) collabore déjà avec le collectif EDStar (cf. publications 4 & 5), ainsi que Marie-Hélène Lécureux et Alain Rabier (chercheurs partenaires). Avec Patrice Venturini (Professeur des Universités émérite), ils participeront à tous les développements de l'axe 4 du point de vue des didactiques des mathématiques et de la physique dans le cadre collaboratif du projet LAVEC, avec le double objectif de co-produire des connaissances scientifiques et celui de contribuer à la co-élaboration d'une réponse à la demande sociale dans laquelle s'inscrit le projet (notamment sur la formation des enseignants et des animateurs scientifiques).
Principales installations, infrastructures et équipements de recherche	Le laboratoire dispose d'un appui technologique au sein de ses établissements de tutelle pour tout ce qui est relatif au recueil et au stockage des données (audio, vidéo) nécessaires aux recherches. La politique scientifique du laboratoire s'appuie également sur la définition et le développement d'actions inter-thèmes (visées et contextes de la recherche) qui constituent un outil majeur pour l'intégration du projet scientifique de l'Unité.

Annexe 6. Liste des journaux et congrès visés

En complément de la stratégie institutionnelle, ce tableau ci-dessous regroupe un nombre de journaux dans lesquels les chercheurs et chercheuses du projet LAVEC ont eu et auront l'occasion de publier leurs travaux.

Area	Scientific journals	Nb of papers	Conferences/Seminars/Workshops	Nb of participation
Buildings	Energy & Buildings/Construction innovation/ Journal of Information Technology in Construction	4	BuildSys: ACM International Conference on Systems for Energy-Efficient Buildings, Cities, and Transportation/Journées scientifiques VDBI	3*3=9
Radiative transfer-material science	International Journal of Heat and Mass Transfer	2	Journées Annuelles GDR TAMARYS International Symposium on Radiative Transfer Congrès Français de Thermique	6*2=12
Numerical, statistical methods	Journal of Numerical Analysis Journal of Computational Physics	1	Journal of Computational Physics?	3
Education & Didactique	International Journal of Science Education Journal of Research in Science Teaching Recherche en Didactiques des Sciences et des Technologies Education & didactique	4	ECER Conference / ESERA Conference / Rencontres scientifiques de l'Association pour les Recherches en Didactique des Sciences et des Technologies (ARDIST)	3+6=9
Sciences du climat	Science Advances James GRL	4	American Geophysical Union European Geophysical Union Ateliers de Modélisation de MétéoFrance	3*3=9
Total		15	Total	42

Annexe 7. Courts CV des porteurs des axes de recherche

Axe 1 : Stéphane Blanco est Maître de Conférences HDR. Son travail est inscrit pleinement dans les sciences de l'ingénieur, avec une dimension de physique théorique qui relève de la thermodynamique des processus hors équilibre. Sur le plan méthodologique, il travaille spécifiquement autour de la méthode de Monte Carlo avec un savoir-faire reconnu dans la reformulation intégrale des algorithmes et dans la revisite assez fondamentale des processus statistiques couplés non-linéairement. Il est co-animateur du groupe Edstar depuis 25 ans.

- **Doctorat** : 19/12/1996, Université Paul Sabatier, LGC et LESETH (Toulouse);
- **HDR** : 27/05/2021, Université de Toulouse, Laplace ;
- **Statut** : Maître de Conférences, Université de Toulouse, Laplace, depuis X ;
- **Responsabilités institutionnelles** : *Participation à des contrats institutionnels (ANR, AO, BQR, PEPS, Région, etc.)* : 25 / *Membre de réseaux de recherche* : GDR Tamarys, GDR

Accort. Fédération FEDESOL. Institut complexité XSYS / *Formation*: Direction du M2 Physique et Chimie pour l'Enseignement (2010-2013); Direction de la mention Énergétique du M1 Physique fondamentale (2004-2011); Responsable du bloc thermodynamique Université Paul Sabatier - LFLEX (2021-); Responsable du parcours Cycle Universitaire Préparatoire aux Grandes Ecoles en Physique L1 et L2 (2018-à présent)

- **Directeur/Encadrant/co-directeur de thèse** : 26 ; Encadrant de post-doctorant : 10 ; encadrant de stagiaire en recherche M1 et PFE, 25, et M2,15 ;
- **Éléments bibliométriques** : 65 publications de revues internationales de rang A, 60 congrès internationaux et 55 congrès nationaux, 6 chapitres d'ouvrages, plus de 120 actes de valorisation/communication grand public;
- **Nombre moyen de citations** : 51 (Scholar Google), 44 (Th. Reut.), h-index : 25 (Scholar Google) ; i10 : 47 (Scholar Google);
- **Revues** : SCIENCE (1), PNAS(2), Scientific Report(1), Phys.Rev.Lett.(2), SciGraph (1), Europhys.Lett.(3), Appl.Phys.Lett.(1), JQSRT(8), Plos(4), Phys.Rev.E (2), International Journal of Multiphase Flow(1), J.Stat.Phys.(1), etc..

Axe 2 : Simon Eibner est Maître Assistant. Son travail porte sur la simulation des transferts thermiques et de la cinétique chimique par la méthode de Monte Carlo avec des applications en solaire à concentration et en pyrolyse de biomasse. Il enseigne en thermique et en mécanique des fluides et encadre des projets de thermique du bâtiment auprès des étudiant.e.s en option "Energies". Il est impliqué dans le groupe EDstar et co-animateur au sein de FédEsol.

- **Doctorat** : 14/12/2015, Cirad, laboratoire BioWooEB ;
- **Statut** : Maître Assistant, IMT Mines Albi, RAPSODEE, depuis le 01/09/2019 ;
- **Responsabilités institutionnelles** : Fédération FEDESOL (co-animateur de l'axe "Concentration et Solaire Thermodynamique", GDR Tamarys. Co-organisateur du congrès JNES 2022. Responsable des modules de Mécanique des Fluides, Énergie Solaire et Échangeurs thermiques à IMT Mines Albi.
- **Directeur/Encadrant/co-directeur de thèse** : 3 en tant qu'encadrant ; 1 en tant que co-directeur ; encadrant de stagiaire (IUT, M1, M2) : 11 ;
- **Éléments bibliométriques** : 7 articles dans des journaux au comité de lecture ; h-index: 5 (Google Scholar); i10: 3 (Google Scholar);
- **Revues** : Solar Energy (1), J. Phys. Chem. A (1), Applied Catalysis B: Environmental (1), Plos (1), JAAP (1).X

Axe 3 : Frédéric Hourdin (cf. [Section 3.1](#))

Axe 4 : Lionel Pélissier est Professeur agrégé de physique en lycée, et classes préparatoires aux grandes écoles, puis formateur à l'IUFM de l'académie de Toulouse, docteur en didactique de la physique en 2011. Il est depuis 2014 maître de conférences en sciences de l'éducation, didactique de la physique, à l'Université Toulouse 2 Jean Jaurès, formateur d'enseignants de sciences physiques à INSPE Toulouse Occitanie Pyrénées et rattaché au laboratoire UMR EFTS (Education, Formation, Travail, Savoirs). Recherchant initialement sur l'étude des rapports d'élèves de lycée à la nature de la science, en particulier sur la place et la signification qu'à le « modèle » physique dans l'enseignement, ses recherches portent aujourd'hui sur l'analyse des pratiques d'enseignement et d'étude de la physique à partir d'enregistrements vidéo d'activités de classe, dans une perspective comparatiste. Se rapprochant régulièrement du collectif EDSTAR depuis une dizaine d'années, ses questions portent aussi sur l'enseignement et l'étude de la physique de l'énergie, en particulier sous sa formulation statistique, propre au travail conduit dans ce collectif.

- **Doctorat** : 07/12/2011, Université Toulouse 2 Le Mirail, UMR EFTS ;
- **Statut** : Professeur agrégé et Maître de conférences, Université Toulouse 2 Jean Jaurès, UMR EFTS, depuis 2014.

- **Responsabilités institutionnelles** : Responsable de l'axe « Savoirs et Phénomènes Didactiques » de mon laboratoire de 2017 à 2021, Membre du conseil d'administration de la structure fédérative de recherche VISA (Vidéos de Situations d'Apprentissage) et du conseil d'administration de l'association francophone pour des recherches en didactiques des sciences et des technologies (ARDiST); Présidence de comités scientifiques et d'organisation des rencontres internationales de l'ARDiST à Toulouse en 2022.
- **Directeur/Encadrant de thèse** :
- **Éléments bibliométriques** : 3 articles scientifiques dans des revues à comité de lecture, 4 chapitres d'ouvrages, éditeur de deux ouvrages et de 11 communications dans des congrès internationaux.
- **Revues**: Presses Universitaires du Mirail, Éducation & Didactique.

Annexe Partenariats

Annexe 8. Métiers et pratiques

Métiers et pratiques/ Domain and practices	Noms – Prénoms des personnes Name – First name	Partie-Prenante/ Stakeholders
Education	Trossélo Mathieu	Collectivité
<p>Environnement labellisé : Le Centre d'Accueil de Saint-Front est un centre d'hébergement touristique labellisé par l'AFNOR. Ce label européen confirme le fort engagement environnemental de l'équipe en termes d'organisation et de structure. Le cahier des charges réunit pas moins de 22 points de critères obligatoires répartis par catégorie. A cela se rajoute l'acquisition de 23 points sur des critères optionnels. Ce certificat a notamment été accompagné dans sa mise en œuvre par la ligue de l'enseignement et l'ADEME. Les différents critères auxquels ils/elles ont répondu sont de l'ordre de (i) la gestion générale (Politique environnementale, formation du personnel, information clientèle, suivi des consommations.), (ii) la qualité de l'eau avec la mise en place de système et d'appareillage d'économie d'eau (sanitaires, douche lave-linge), (iii) la gestion des déchets, l'entretien des espaces verts, l'animation d'ateliers sur l'environnement, l'implémentation d'énergies renouvelables, la gestion d'une alimentation issue de produits locaux, bio.; et en particulier le critère Énergie pour lequel la régulation thermique avec pompe à chaleur, l'éclairage à basse consommation, l'installation d'un chauffe-eau solaire et une audit énergétique ont été implémentés; permettant ainsi de mettre en place un plan de réduction de la consommation énergétique. Tous les 2 ans la structure recevra un nouvel audit de l'AFNOR permettant de s'assurer de la bonne tenue de travail selon les critères déjà remplis mais devra aussi assurer de nouveaux objectifs afin d'être dans la continuité de ses engagement environnementaux. Des travaux (e.g., pose de double vitrage efficace, isolation) de rénovation énergétique sont envisagés et offriront aux chercheur.ses du projet LAVEC une nouvelle opportunité de collaboration.</p> <p>Education et communication : Le CAP accueille des classes de découverte (https://www.sejours-educatifs.org/vv/voyage-scolaire/sejour/dossier_pedagogiques_informations_generales/saint-front-36655/), des colonies de vacances, des séjours adaptés pour adultes, des événements familiaux en plus de séminaires ce qui constitue une autre opportunité d'expérimentations pour notre démarche éducative (Section 2 4.3).</p> <p>Communication : Le CAP a un réseau de communication très étendu pour diffuser ses messages auprès de publics extérieurs. La presse régionale est par exemple utilisée pour cibler des groupes de personnes très précis (les habitants) dans le cadre de séminaires scientifiques (https://www.lacommere43.fr/les-sorties-et-loisirs/trouver-une-sortie/ad/3-conference/6638-conference-sur-la-thermodynamique-et-pompe-a-chaleur.html).</p> <p>Les lettres d'engagement de M. Sébastien PERRET, Directeur de la Ligue de l'enseignement de la Haute-Loire (cf. Annexes 11), et de M. Pierre ROUSSEL, Président de l'association de gestion du Centre d'Accueil Polyvalent « Gérard Chavaroché » (cf. Annexe 12) confirment la relation de confiance qui s'est installée et leur engagement total pour ce projet LAVEC.</p>		

Annexe 9. Laboratoires non financés

Discipline	Noms – Prénoms- Orcid des personnes	Laboratoire	Etablissement rattachement des personnes	Pays
Historienne des sciences	Guillemot Hélène - 0000-0001-8776-0528	Centre Alexandre Koyré	CNRS	France
Didactique de la physique, SVT et de la chimie	Morge, Ludovic IdRef: 118185276 Volla, Sébastien Collard, Eric	INSPE	Université de Clermont Auvergne	France

Annexe 10. Terrains envisagés

Terrain	Noms – Prénoms- du porteur territorial	Expérimentation envisagée ou déjà lancée	Inscrit dans un dispositif aidé par la Banque des Territoires (DVD, TID...)
Plateau volcanique du Mézenc/Sud de l'Auvergne-Centre de Saint-Front	Monsieur le Maire de Saint-Front, Philippe Delabrere	Détails à retrouver dans les Sections 2 § 4.3 & l' Annexe 8 où la description du CAP se situe.	Pas de dispositif de ce type. Par contre, le CAP profite d'un ancrage territorial très fort et d'un soutien de la municipalité important ; invitant à ses assemblés générales les responsables de mairie que les porteurs ont pu rencontrer au cours du montage du projet LAVEC.
Clermont-Ferrand, Auvergne-Rhône-Alpes, France	Céline Montero, Chargée de Mission Tourisme durable - Ecolabel Européen	Faisant partie de la ligue de l'enseignement nationale, elle pourra apprécier l'intégration des résultats de LAVEC aux bénéfices de l'Ecolabel.	Pas de dispositif de ce type. Cependant, le CAP est épaulé dans sa démarche de développement durable élaborée par la Ligue de l'enseignement.

Annexe 11. Lettre d'engagement de Ligue de l'enseignement de la Haute-Loire



**Lettre d'engagement de l'association
Projet LAVEC**

A la suite des différents échanges que nous avons eus, le conseil d'administration de l'association, dont nous sommes membres, a validé le principe de l'implication de l'association de gestion du centre d'accueil polyvalent « Gérard Chavaroche » dans la réalisation des objectifs attachés à ce projet.

La ligue de l'enseignement de la Haute-Loire est membre du conseil d'administration et travaille étroitement avec le centre d'accueil de Saint-Front.

Notre mouvement, depuis ses débuts, s'est engagé à promouvoir les valeurs véhiculées par le développement durable.

Nous informons, sensibilisons et éduquons tous les publics à l'environnement et au développement durable en abordant le développement durable dans toutes ces dimensions (social, économie et environnement), en accompagnant la réflexion et la compréhension des enjeux.

En proposant des moyens d'actions et des solutions pratiques, la finalité du travail entrepris est de rendre chacun un peu plus conscient, responsable et acteur de la qualité de son cadre de vie, afin de tendre vers une mise en œuvre concrète du développement durable à l'échelle locale.

La décision de cet engagement procède ainsi d'une logique et d'une ambition attachée à notre projet associatif porté lui-même par les valeurs de l'éducation populaire.

Ainsi depuis plus de trente ans nous sensibilisons nos usagers à l'éducation à l'environnement et au développement durable tout aussi bien à travers les activités que nous leur proposons que par les modalités de fonctionnement et les conditions d'accueil que nous leur offrons.

La proposition d'implication qui nous a été faite par nos interlocuteurs de ce projet, qui fréquentent depuis de nombreuses années notre structure est donc en parfaite cohérence avec notre propre projet associatif.

La Ligue de l'enseignement de la Haute-Loire porte un regard bienveillant à votre sollicitation.

Sébastien PERRET
Directeur de la Ligue de l'enseignement de la Haute-Loire



Annexe 12. Lettre d'engagement de l'association de gestion du centre d'accueil (CAP) de Saint-Front

Lettre d'engagement de l'association de gestion du centre d'accueil de Saint-Front
Projet LAVEC

Suite aux échanges que nous avons eus avec nos interlocuteurs du collectif EDSTAR porteuse du projet LAVEC, le conseil d'administration de l'association a validé le principe de l'implication de l'association de gestion du centre d'accueil polyvalent « Gérard Chavaroche » dans la réalisation des objectifs attachés à ce projet.

Notre association a toujours été attentive à prendre en compte les enjeux et les empreintes de son activité sur son milieu et sur ces usagers, de toute nature qu'ils soient (économiques, sociaux, éducatifs, environnementaux...).

La décision de cet engagement procède ainsi d'une logique et d'une ambition culturelles et historiques attachée à notre projet associatif porté lui-même par les valeurs de l'éducation populaire.

Ainsi depuis plus de trente ans nous sensibilisons nos usagers à l'éducation à l'environnement et au développement durable tout aussi bien à travers les activités que nous leur proposons que par les modalités de fonctionnement et les conditions d'accueil que nous leur offrons.

En 2006 nous avons ainsi inauguré un nouveau bâtiment dont l'alimentation en énergie pour son chauffage repose sur l'exploitation des principes de la géothermie.

Depuis trois ans nous avons travaillé afin d'obtenir un Eco-label européen formalisant notre engagement dans la prise en compte des enjeux climatiques.

La proposition d'implication qui nous a été faite par nos interlocuteurs de ce projet, qui fréquentent depuis de nombreuses années notre structure est donc en parfaite cohérence avec notre propre projet associatif.

Sa mise en œuvre au sein de notre structure lui fera franchir indéniablement un saut qualitatif dans sa mise en œuvre. Il participera aussi à renforcer notre « image de marque environnementale » et sera sans doute source de développement de notre activité.

La mise à disposition de notre équipement pour l'installation de tous les instruments de mesures qui abonderont en données la dimension recherche scientifique ainsi que la perspective d'avoir du personnel dédié à cette mission sont pleinement intégrées dans nos engagements.

Nous attachons tout autant d'importance à l'implication de ce personnel et des « chercheurs » pour alimenter la dimension pédagogique et éducative d'activités que nous pourrions mettre en œuvre en direction des usagers du centre et des citoyens du territoire pour une meilleure connaissance et compréhension des enjeux de la transition climatique (une vulgarisation véritablement référencée scientifiquement).

Enfin, la présence des réseaux d'éducation populaire, CEMEA et Ligue de l'Enseignement notamment, tout comme celle de la commune de Saint-Front dans la gouvernance de l'association peut être un atout non négligeable pour la reconnaissance et la diffusion des enjeux, des intérêts et des enseignements de la réalisation de cette recherche appliquée.

En tant que Président de l'association mais aussi qu'ancien professeur de physique et directeur des CEMEA Rhône-Alpes et aujourd'hui en tant que délégué régional en Nouvelle-Aquitaine d'Héxopée, syndicat employeur de la branche ECLAT¹ qui travaille sur l'évolution des métiers liée à

¹Branche des métiers de l'Education, de la Culture, des Loisirs et de l'Animation agissant pour l'utilité sociale et environnementale au service des Territoires

la prise en compte de la transition climatique, vous comprendrez aussi tout l'intérêt personnel que je porte à votre sollicitation et à notre réponse.

Pierre ROUSSEL
Président de l'association de gestion
du Centre d'Accueil Polyvalent « Gérard Chavaroche »

Publications Appendix

LAPLACE :

- Nyffenegger-Péré, Y.; ...; Bati, M.; Blanco, S.; Dufresne, J.-L.; Hafi, M. E.; Eymet, V.; Forest, V.; Fournier, R.; Gautrais, J.; ...; Mourtaday, N.; Paulin, M. Spectrally Refined Unbiased Monte Carlo Estimate of the Earth's Global Radiative Cooling. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 2024, 121 (5), e2315492121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2315492121>.
- Bati, M.; Blanco, S.; Coustet, C.; Eymet, V.; Forest, V.; Fournier, R.; Gautrais, J.; ...; Piaud, B. Coupling Conduction, Convection and Radiative Transfer in a Single Path-Space: Application to Infrared Rendering. *ACM Trans. Graph.* 2023, 42 (4), 1–20. <https://doi.org/10.1145/3592121>.
- Ibarrart, Loris. Advection, Diffusion and Linear Transport in a Single Path-Sampling Monte-Carlo Algorithm: Getting Insensitive to Geometrical Refinement. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03818899>.
- Villefranche, N.; Hourdin, F.; ...; Blanco, S.; ...; Caliot, C.; Coustet, C.; Dauchet, J.; El Hafi, M.; Eymet, V.; Farges, O.; Forest, V.; Fournier, R.; Gautrais, J.; Masson, V.; Piaud, B.; Schoetter, R. The “Teapot in a City”: A Paradigm Shift in Urban Climate Modeling. *Sci. Adv.* 2022, 8 (27), eabp8934. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abp8934>.
- Tregan, J. M.; Amestoy, J. L.; Bati, M.; Bezian, J.-J.; Blanco, S.; ...; Caliot, C.; ...; Coustet, C.; ...S.; Eibner, S.; El Hafi, M.; Eymet, V.; Farges, O.; Forest, V.; Fournier, R.; Galtier, M.; ...; Gautrais, J.; He, Z.; Hourdin, F.; ...N.; Nyffenegger-Péré, Y.; Pelissier, L.; ... Piaud, B.; ... Villefranche, N.; ... Coupling Radiative, Conductive and Convective Heat-Transfers in a Single Monte Carlo Algorithm: A General Theoretical Framework for Linear Situations. *PLOS ONE* 2023, 18 (4), e0283681. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0283681>.

RAPSODEE:

- He, Z.; Lapeyre, P.; Blanco, S.; Eibner, S.; El Hafi, M.; Fournier, R. Monte-Carlo Estimation of Geometric Sensitivities in Solar Power Tower Systems of Flat Mirrors. *Sol. Energy* 2023, 253, 9–29. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.02.013>.
- Nyffenegger-Péré, Y.; Carrier, M.; Eibner, S.; El Hafi, M.; Nasfi, M.; Sahim, A. A Monte Carlo-Based Strategy to Assess Complex Kinetics: Application of the Null-Reaction Method to DAEM. *J. Phys. Chem. A* 2023, 127 (8), 1988–1997. <https://doi.org/10.1021/acs.jpca.2c06893>.
- Sahim, A.; Carrier, Marion; Eibner, S.; El Hafi, M. Modeling the Influence of Temperature on Product Distribution from Biomass Fast Pyrolysis by the Monte Carlo Method.
- Lapeyre, P.; He, Z.; Blanco, S.; Caliot, C.; Coustet, C.; Dauchet, J.; Hafi, M. E.; Eibner, S.; d'Eon, E.; Farges, O.; Fournier, R.; Gautrais, J.; Mourtaday, N. C.; Roger, M. A Physical Model and a Monte Carlo Estimate for the Specific Intensity Spatial Derivative, Angular Derivative and Geometric Sensitivity. 2022. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2206.05167>.

LMD:

- Hourdin, F.; Ferster, B.; Deshayes, J.; Mignot, J.; Musat, I.; Williamson, D. Toward Machine-Assisted Tuning Avoiding the Underestimation of Uncertainty in Climate Change Projections. *Sci. Adv.* 9 (29), eadf2758. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adf2758>.
- Bonnet, R.; Swingedouw, D.; Gastineau, G.; Boucher, O.; Deshayes, J.; Hourdin, F.; Mignot, J.; Servonnat, J.; Sima, A. Increased Risk of near-Term Global Warming Due to a Recent AMOC Weakening. *Nat. Commun.* 2021, 12 (1), 6108. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26370-0>.
- Madeleine, J.; Hourdin, F.; Grandpeix, J.; Rio, C.; Dufresne, J.; Vignon, E.; Boucher, O.; Konsta, D.; Cheruy, F.; Musat, I.; Idelkadi, A.; Fairhead, L.; Millour, E.; Lefebvre, M.; Mellul, L.; Rochetin, N.; Lemonnier, F.; Touzé-Peiffer, L.; Bonazzola, M. Improved Representation of Clouds in the Atmospheric Component LMDZ6A of the IPSL-CM6A Earth System Model. *J. Adv. Model. Earth Syst.* 2020, 12 (10), e2020MS002046. <https://doi.org/10.1029/2020MS002046>.

EFTS:

- Péliissier, L.; Blanco, S.; Fournier, R. La Physique Des Transferts Thermiques Couplés : Des Résultats Récents de La Recherche En Physique à La Formation Des Professeurs Stagiaires Aux Questions Énergétiques, 2022.
- Péliissier, L.; Witczak, Nathalie. La Pratique Du Questionnement Dans l'enseignement de La Physique Dans Le Secondaire. *Actualité des recherches en didactique des sciences et des technologies.* 2021. https://ardist.org/wp-content/uploads/2021/04/ARDIST_2018.pdf.
- Maron, Valentin; Dufresne, J.-L.; Pelissier, L.; Rabier, A.; Cochevin, M. Cheminement Conceptuel Empiriquement Fondé Pour Comprendre Le Rôle Du CO² Dans Le Réchauffement Climatique. *Actualité des recherches en didactique des sciences et des technologies.* 2024.