



**The Transition
Institute 1.5**
L'ambition d'une véritable transition

RAPPORT D'ACTIVITÉ 2023

Table des MATIÈRES



LE MOT DE LA DIRECTRICE	p.4
<hr/>	
1. LES OBJECTIFS	p.5
<hr/>	
2. NOTRE ORGANISATION	p.6
2.1 Les acteurs internes	p.6
2.2 Les acteurs externes	p.7
2.3 Bilan sur la structuration interne de l'Institut	p.7
<hr/>	
3. OFFRE DE FORMATION DE HAUT NIVEAU ET RECHERCHE : PARCOURS ACADÉMIQUE ET DOCTORAL	p.9
3.1 Le parcours académique	p.9
3.2 Le parcours doctoral	p.10
3.2.1 Le doctorat financé et le doctorat labellisé	p.10
3.2.2 Contributions scientifiques	p.11
<hr/>	
4. RÉTROSPECTIVE SUR NOS ÉVÈNEMENTS	p.14
4.1 Agenda de l'année	p.14
4.2 1er Forum TTI.5 : « Enjeux sécuritaires des changements climatiques »	p.16
4.3 Retour sur nos actions à l'International	p.18
4.3.1 Participation à la COP28 au Émirats Arabes Unis	p.18
4.3.2 Séjour de recherche au Sénégal	p.20
4.3.3 Organisation d'une Autumn School internationale	p.21
<hr/>	
5. PRESSE ET MÉDIAS	p.24
<hr/>	

6. RAPPORT PAR AXES DE RECHERCHE TTI.5	p.25
6.1 Axe 1 : Le design de la transition	p.25
6.1.1 Description et objectifs de l'axe	p.25
6.1.2 Paroles de chercheurs	p.26
6.1.3 Focus thématique	p.26
6.1.4 Fait marquant	p.26
6.1.5 Conclusion et propositions pour l'avenir	p.27
6.2 Axe 2 : Une planète électrique ?	p.28
6.2.1 Description et objectifs de l'axe	p.28
6.2.2 Paroles de chercheurs	p.30
6.2.3 Focus thématique	p.31
6.2.4 Faits marquants	p.32
6.2.5 Conclusion et propositions pour l'avenir	p.33
6.3 Axe 3 : La planète inclusive	p.34
6.3.1 Description et objectifs de l'axe	p.34
6.3.2 Paroles de chercheurs	p.34
6.3.3 Focus thématique	p.36
6.3.4 Fait marquant	p.37
6.3.5 Conclusion et propositions pour l'avenir	p.37
6.4 Axe 4 : La planète comme enjeu d'influence	p.38
6.4.1 Description et objectifs de l'axe	p.39
6.4.2 Paroles de chercheurs	p.40
6.4.3 Focus thématique	p.40
6.4.4 Faits marquants	p.41
6.4.5 Conclusion et propositions pour l'avenir	p.43

Le mot de la DIRECTRICE

Dans un quotidien environnemental à la dérive, l'Institut TTI.5 de Mines Paris – PSL est devenu une valeur refuge.

Hors les murs, mais inclusive, cette initiative totalement originale poursuit son objectif de consolider tout en invitant à la créativité et à l'interdisciplinarité, afin d'apporter notre réponse de scientifiques à l'injonction à l'action insufflée par le dernier rapport du GIEC.

Lancée en avril 2022, cette initiative vient de bien plus loin, car elle repose sur la synthèse de réflexions que nous menons depuis 25 ans au sein de Mines Paris – PSL sur et autour du sujet du climat. Elle se propose d'élaborer sur les questions d'adaptation, d'atténuation et de biodiversité dont l'enchevêtrement n'est plus à démontrer. Nos 5 axes de recherche proposent une déclinaison de ce complexe de problèmes, qui bousculera parfois des idées reçues : ainsi TTI.5 interroge le design de la transition, l'électrification de la planète, son inclusivité, le détournement de la question climatique à des fins d'influence et enfin sa relation au vivant.

Le gage de réussite de TTI.5 a été l'engouement que nous avons réussi à susciter en interne et en externe. Tout d'abord dans la communauté des Mines, avant de nous élargir à PSL, rassemblant disciplines et univers différents : élèves du Cycle Ingénieur Civil, élèves de tous cycles, élèves chercheurs, chercheurs et enseignants-chercheurs de tous laboratoires, administratifs de tous les services, en tout une centaine de personnes contribuent à ce jour, désireux de se laisser entraîner et d'entraîner une démarche créatrice et innovante. Une aventure certes, mais calculée, pour emprunter à Pierre Massé dans son guide sur l'élaboration de stratégies : il s'agit de proposer « une prothèse au décideur aveugle désireux d'une aventure calculée ».

Notre rayonnement vers décideurs, parties prenantes, acteurs de la société civile, politiques, s'inscrit dans cette démarche, un rayonnement auquel, en cette année 2023, nous avons particulièrement veillé. Ainsi, notre travail de consolidation, d'articulation et de diffusion a assuré à l'Institut TTI.5 une



N. MAÏZI © Frédérique Toulet

notoriété rapide : forum, webinaires, écoles d'été/d'automne/d'hiver, notes d'éclairage et workshop sont devenus des rendez-vous réguliers et plébiscités dont la fréquentation ne cesse de croître.

C'est à plusieurs titres que TTI.5 est devenu un lieu d'innovation, car outre son programme, c'est sa gouvernance qui bouscule les schémas classiques. Autour de sa directrice et de son équipe pilote, cette gouvernance s'inscrit dans la transversalité, la collégialité et le caractère participatif comme en témoignent : un comité pilotage composé de 19 volontaires chercheurs et administratifs, des chercheurs référents volontaires qui se structurent par axe, ou encore des jeunes chercheurs et des élèves qui se portent volontaires pour acquérir le label TTI.5, un Conseil où s'échangent mécènes, observateurs et représentants de notre École pour agir comme un vrai lieu de ... conseil.

Nous n'avons pas été surpris par l'ampleur de notre succès, car avec celles qui à mes côtés opèrent cette proposition créative et innovante, nous nous sommes engagées de manière absolue et entière depuis son lancement en avril 2022 et je tiens à les remercier ici très chaleureusement : Alice SPASARO et Claire CAUMEL. Je tiens également à saluer l'arrivée de ceux qui accompagnent la montée en puissance de ce beau projet : pour les aspects pédagogiques Sabrina BEKLI et pour la communication Cédric STANGHELLINI.

Ce rapport vous propose de découvrir plus en détail comment s'articulent nos activités 2023. C'est une première édition, dans laquelle vous verrez, nous tâtonnons encore, mais j'espère qu'à l'issue de sa lecture vous partagerez notre enthousiasme !

Nadia MAÏZI

1. Les OBJECTIFS

Le changement climatique, et les nombreuses conséquences qui en découlent – multiplication des phénomènes météorologiques destructeurs, déplacement de population, tensions pour l'accès aux ressources, enjeux pour la biodiversité, etc. – nécessitent une réponse scientifique pluridisciplinaire. Face à l'impératif climatique et afin de poursuivre la recommandation du GIEC de limiter le réchauffement global à 1.5°C par rapport à l'ère préindustrielle, il est urgent dans la décennie à venir de s'engager pour l'atténuation des émissions de gaz à effets de serre et de s'adapter. Le lancement de The Transition Institute 1.5 (TTI.5), en mai 2022, est la réponse de Mines Paris à ce contexte complexe.

L'Institut TTI.5 est une **structure s'appuyant sur une vision partagée** élaborée en co-construction par les différentes entités de Mines Paris - PSL. Articulé autour d'un projet scientifique ambitieux, TTI.5 permet de mailler des compétences en interne et en association avec des réseaux prestigieux.

En intégrant l'ensemble de ces travaux dans son champ de réflexion, TTI.5 propose une **meilleure articulation des contributions de l'École autour d'une transition articulant atténuation et adaptation**. Ceci doit permettre à Mines Paris de se positionner en lieu d'influence en interaction forte avec la société, pour **éclairer le débat public et les choix des décideurs**. Ainsi TTI.5 joue à la fois un **rôle de fédération et de rayonnement** : d'une part, il permet une lisibilité et une visibilité accrues des recherches et développements techniques, économiques et sociaux réalisés par l'ensemble des acteurs de l'École autour de la transition ; d'autre part, il positionne l'École comme un acteur majeur de la recherche de sortie des impasses que connaissent aujourd'hui les questions liées au changement climatique.

Pour réaliser ces missions, TTI.5 a été structuré dans le but de **permettre aux enseignants-chercheurs de tous les départements de l'École de s'investir dans son fonctionnement et dans son programme scientifique** (Comité de suivi, enseignants-chercheurs référents, appel à projets). Nous avons également mis en place de nombreux événements (Forum, workshop, webinaires, formation internationale) et **des outils pour créer une dynamique et pour faire rayonner leurs recherches** en lien avec la transition, en interne comme vers l'extérieur. Nous concentrons également une partie conséquente de nos efforts vers les élèves et les élèves-chercheurs grâce à la mise en place du parcours académique, du parcours doctoral TTI.5 et via l'organisation d'une semaine de formation internationale.

Pour plus d'informations, retrouvez le manifeste de l'Institut ici :

https://the-transition-institute.minesparis.psl.eu/wp-content/uploads/2023/08/Manifeste_The-Transition-Institute-1.5_Sept-2023.pdf



L'équipe de TTI.5 accompagnée de membres du Comité de suivi TTI.5 et de doctorants au 1er Forum TTI.5

2. Notre ORGANISATION

Notre vocation est de réaliser le maillage de nos compétences en interne tout en assurant un rayonnement externe. Cela se traduit au niveau de la gouvernance qui s'articule en deux niveaux entre les acteurs en interne et les acteurs en externe.

2.1 Les acteurs internes

Direction et équipe pilote



Nadia MAÏZI
Directrice de TTI.5



Claire CAUMEL
Cheffe de projet en charge de la coordination de TTI.5



Alice SPASARO
Responsable administrative et diffusion scientifique pour TTI.5



Sabrina BEKLI
Chargée de coordination des parcours académique et doctoral TTI.5



Cédric STANGHELLINI
Chargé de communication pour TTI.5

Le comité de suivi interne

Le comité de suivi a un rôle décisionnaire. Il a la charge de la politique scientifique de l'Institut et assure sa mise en œuvre : il met en place les jurys de sélection des candidatures des thèses, il réalise un suivi régulier des travaux de l'Institut, valide le budget et son attribution. Il est composé d'enseignants, de chercheurs ou d'élèves de Mines Paris - PSL, et représentants des services communs.

Liste des membres :

- Franck AGGERI (CGS)
- Francesco DELLORO (MAT)
- Cathy DESCAMPS-LARGE (ISIGE)
- Petr DOKLADAL (CMM)
- Robin GIRARD (PERSEE)
- Sébastien JOANNÈS (MAT)
- Agnès LABOUDIGUE (Direction de la recherche)
- Matthieu MAZIÈRE (DIRENS & MAT)
- Charbel MOUSSA (CEMEF),
- Magalie PRUDON-RIVIÈRE (Bibliothèque)
- Guillaume ROUY (Cycle Ingénieur Civil)
- Oriane SENNINGER (CEMEF)
- Valentina SESSA (CMA)
- Irina SIN (GEOSCIENCES)
- Claude TADONKI (CRI)
- Isabelle THENEVIN (GEOSCIENCES)

Les enseignants-chercheurs

Sur la base du volontariat, les enseignants-chercheurs de l'École s'impliquent comme :

- Référents par axe de recherche
- Porteurs de thèse, de projets
- Encadrant de doctorant, d'élèves
- Animation de séminaires
- Rédacteur de contenu
- Le comité de suivi interne

2.2 Les acteurs externes

Le Conseil de TTI.5

Le Conseil TTI.5 joue un rôle consultatif. Il s'agit d'un espace d'animation, d'échanges et de débats. Les discussions – sources d'éclairages sur les points d'attention, sur les problématiques concrètes et sur les réalités de terrain – permettent de challenger les questions de recherche de l'Institut. Seront également discutés l'organisation de cycle et en particulier le Forum annuel de haut niveau de l'institut. Il est composé des mécènes de l'Institut, d'observateurs et des parties prenantes invitées.

2.3 Bilan sur la structuration interne de l'Institut

L'Institut a fêté son premier anniversaire au mois de mai 2023, le bilan en cette fin d'année civile est très prometteur. TTI.5 a réussi à créer **une communauté en interne active composée de plus d'une centaine de chercheurs, doctorants, élèves et personnel administratif** de l'École :

- Plus de 60 enseignants-chercheurs et personnels administratifs :
 - 38 chercheurs sont impliqués directement dans le fonctionnement de l'institut et/ou dans l'animation des axes de recherche.
 - 44 sont encadrants de thèse TTI.5 et de thèse de Mines Paris - PSL que nous avons labellisées TTI.5 sur candidature.
 - 6 personnels administratifs impliqués dans le fonctionnement (hors équipe pilotage de l'Institut)
- 47 doctorants ont intégré le parcours doctoral que nous avons créé : nous avons recruté 10 doctorants et 1 postdoc (voir tableau 1), par ailleurs 36 doctorants de Mines Paris ont rejoint le parcours de labellisation TTI.5.
- 29 élèves du cycle ingénieur civil de Mines Paris - PSL sont impliqués dans notre parcours académique.

Cette communauté est répartie dans les **5 départements de Mines Paris - PSL** (Économie, management et société, Énergétique et procédés, Mathématiques et Systèmes, Mécanique et matériaux, Sciences de la terre et de l'environnement).

Nous avons insufflé une dynamique d'échange et de collaboration entre les centres et les départements de l'École à travers : le financement



1er Workshop TTI.5 ©TTI.5

de thèses co-dirigées et interdisciplinaires, le **référencement** de l'ensemble des travaux de thèse et des projets de recherche de l'École en lien avec la transition dans une base de donnée accessible en ligne, la **co-construction des trajectoires de recherche** de l'Institut lors d'une journée de workshop interne en avril qui a réuni plus de 80 chercheurs et doctorants de tous les départements, des **productions** (des notes d'éclairages, des synthèses de séminaire, etc.), la **valorisation et la diffusion de travaux** de recherche (webinaires publics interdépartements, des posters et exposés de doctorants), la **diffusion des événements** de Mines Paris en lien avec la transition (**plus de 50 événements relayés** sur notre site web et nos réseaux sociaux à ce jour), etc.

Pour favoriser l'association de tous les personnels au rayonnement et à la dynamique de l'Institut, nous avons rédigé un « Guide Interne » à destination des permanents de l'École. Ce guide est disponible au téléchargement à ce lien : https://the-transition-institute.minesparis.psl.eu/wp-content/uploads/2024/02/TTI.5_Guide_Interne_2024-2.pdf

TÉMOIGNAGES



Francesco DELLORO, spécialiste de la projection thermique au Centre des Matériaux des Mines, a rejoint le Comité de suivi de l'Institut depuis 2022. En 2023, il pilote l'Axe 2 de recherche « Une planète électrique ».

« Je pense que les thèmes touchés par TTI.5 tournent autour des principaux défis sociétaux d'aujourd'hui. Une des ambitions de l'Institut est de pouvoir créer des ponts entre le monde académique (l'École), les décideurs et toute la société, pour alimenter de façon éclairée le débat public et fournir des arguments aux décideurs. Le fait de pouvoir participer activement à ces processus constitue pour moi une forte motivation. »

« En tant qu'Enseignant-Chercheur, The Transition Institute 1.5 me donne les moyens aux experts d'autres disciplines - parfois très éloignées - de faire connaissance et travailler ensemble. La recherche que nous menons au quotidien dans nos métiers demande dans la plupart des cas de se focaliser sur une discipline très spécialisée, mais les innovations les plus intéressantes surgissent souvent des rencontres transdisciplinaires. Les rencontres au sein de TTI.5 vont porter, selon moi, une fertilisation réciproque des différentes disciplines présentes. »



Sébastien JOANNÈS fait partie des tout premiers Enseignants-Chercheurs à avoir participé à la dynamique de création de l'Institut dès mai 2021. Deux ans plus tard, il co-dirige l'une des 5 premières thèses portées par TTI.5 visant à travailler sur la question des machines électriques tournantes qui sont au cœur d'un grand processus d'électrification. Il est chargé de Recherche HDR à Mines Paris - PSL et Responsable adjoint du Département Mécanique et Matériaux.

« TTI.5 est le catalyseur qui permet des échanges transdisciplinaires que nous n'avions pas auparavant. Nous connaissons souvent mal les collègues et les activités des autres départements et pourtant, il y a là une ressource incroyable pour aborder la question de la transition de manière systémique et holistique. »

« La co-direction transdisciplinaire est ici essentielle et nos échanges périodiques entre les équipes nous montrent ô combien la fructification croisée de nos approches respectives est profitable. Cette transdisciplinarité est cependant un exercice difficile : l'équilibre est parfois délicat à trouver pour le doctorant et notre rôle d'accompagnateur et de guide prend ici tout son sens. Nous avons encore du chemin à parcourir pour profiter pleinement de la transdisciplinarité de l'Institut, mais ce n'est pas au premier coup de crampon que l'on conquiert l'Everest ! »

« Pour les Enseignants-Chercheurs, il n'est pas naturel de remettre en cause notre «habitus» et il est bien plus confortable d'évoluer dans la communauté scientifique qui nous a formés. Nous devons explorer des voies nouvelles et encourager les volontaires encore hésitants à rejoindre l'Institut. Les «briques» qui y sont développées permettent l'élaboration des fondations sur lesquelles la société peut, avec réalisme et cohérence, s'engager vers la neutralité carbone. »

3. Offre de FORMATION de haut niveau et recherche : parcours académique et doctoral

3.1 Le parcours académique

Les élèves du Cycle Ingénieur Civil peuvent s'inscrire au parcours TTI.5 en début de 2e année. Ce parcours leur permet d'orienter leur formation sur les enjeux de la transition. Pour valider le parcours, les élèves devront remplir plusieurs conditions : suivre un certain nombre d'enseignements spécialisés labellisés TTI.5, choisir un sujet de trimestre de recherche ou de stage s'inscrivant dans la thématique de la transition, contribuer à la communauté TTI.5 (rédiger une note d'éclairage, faire un compte-rendu de séminaire, etc.).

Les élèves de la première promotion recevront leurs certificats officiels en même temps que leur diplôme d'ingénieurs civils !

➡ 29 élèves du Cycle Ingénieur Civil de Mines Paris – PSL suivent le parcours académique proposé par The Transition Institute 1.5.



TÉMOIGNAGE

Après avoir suivi le Cycle Ingénieur Civil, Damien CAPERAA a intégré le Corps des Mines en septembre 2023, une formation de trois ans qui lui permettra de devenir haut fonctionnaire et de travailler dans des ministères comme celui de l'économie, de la transition énergétique ou de la transition écologique. Il faisait partie des premiers élèves du Parcours académique TTI.5 et a co-rédigé avec Lucille LACOSTE la 7e note d'éclairage « La réforme de l'assurance récolte en France ».

« J'ai souhaité rejoindre le Parcours académique après avoir assisté à la présentation de The Transition Institute 1.5. Je n'ai pas hésité longtemps. En effet, la transition est LE sujet transdisciplinaire par excellence. Des technologies décarbonées aux incitations économiques à leur développement, de l'innovation nécessaire dans les domaines des matériaux à une meilleure connaissance des cycles climatiques, de la place des scientifiques dans la société aux transformations des entreprises, tous les pans de la science et de la société ont un rôle dans cette transition. Un institut comme TTI.5 me paraît très pertinent pour comprendre comment toutes ces transformations pourraient se combiner et construire la société durable dont nous rêvons aujourd'hui. Mines Paris – PSL a cette chance d'avoir des centres de recherche de pointe dans des domaines très variés, et la combinaison de leurs forces proposée par TTI.5 me paraît une excellente initiative. Construire une vision pluridisciplinaire de la transition est vraiment une chose passionnante ! »

3.2 Le parcours doctoral

3.2.1 Le doctorat financé et le doctorat labellisé

Le parcours doctoral TTI.5 offre deux types d'affiliation dont voici les principes :

Le doctorat financé par TTI.5 :

TTI.5 a pour vocation première le financement de thèses interdisciplinaires en lien avec ses thématiques de recherche, dans un cadre collaboratif axé sur la promotion des échanges en interne et la diffusion en externe, ainsi qu'un accès à des formations dédiées.

Les sujets de thèse proposés sont issus d'un appel à projets auquel les enseignants-chercheurs de l'Université PSL et de Mines Paris – PSL peuvent répondre.

➔ En 2023, l'Institut a financé 11 thèses et 1 post-doc, 2 thèses ayant démarré début 2024 (voir tableau 1).

TITRE	CENTRES	AXE DE RECHERCHE	ENCADRANTS	DOCTORANT / POST-DOC
Adaptation des modèles de prospectives à un changement de paradigme sociétal. Exploration des indicateurs pertinents pour le pilotage de la transition écologique.	CMA / CGS	Axe 1 : Le design de la transition	Nadia MAIZI et Franck AGGERI	FEIX Thibaut
Optimisation de l'énergie géothermique de subsurface : du sous-sol au bâtiment	GOESCIENCES / CES		JAHANGIR Emad, ROUABHI Ahmed, TRAN Cong-toan	BEZ Fabien
Analyses économétriques des politiques en faveur de la rénovation énergétique des logements	CERNA / CES		GLACHANT Matthieu, DUPLESSIS Bruno	WALD Guillaume
LIPROD : Évaluation de l'évolution de la capacité de production de Li primaire en réponse aux besoins de la transition	GEOSCIENCES/CERNA		Damien GOETZ, Matthieu GLACHANT	MORTADA Zeinab
Durabilité et cycle de vie de la machine électrique, au cœur des enjeux d'une transition bas-carbone	MAT / OIE	Axe 2 : Une planète électrique ?	ARNAUD Pierre, JOANNES Sébastien, PEREZ-LOPEZ Paula	SAHAOUI Mohamed
Perceptually Based Frugal Models for Low-Carbon AI	CMM / Département d'études cognitives (ENS- PSL)		DOKLADAL Petr, NERI Peter	DOUSAS Delphine
Carbon-aware High-Performance Artificial Intelligence	CRI / CMM / CEMEF		Claude TADONKI, Petr DOKLADAL, Youssef MESRI	NANA TCHAKOUTÉ Roblex
Energy saving by employing thermal superinsulating bio-aerogels	CEMEF / PERSEE	Axe 3 : La Planète inclusive	BUDTOVA Tatiana, RIGACCI Arnaud	EFFRAIMPOULOU Eleni
PREBAT : De la conception à la mise en place : la politique de rénovation des bâtiments à l'épreuve des usage(r)s [Post-doc]	ISIGE / PERSEE		Daniel Florentin et Robin Girard	PERRIN Julie
TASER : Traitements par pLASma froid de fibrEs biosourcées : Vers une chaîne complète d'éco-conception et usage de bio-composites pour l'Industrie 4.0	PERSSEE/ CEMEF		ROHANI Vandad-Julien, BOYER Séverine A.E., Alain BURR	PERRIER-MICHON Flavien
Modèles et outils pour le développement de micro-réseaux de chaleur en milieu rural	CES/CGS		P. STABAT A. FABRE, F. AGGERI & R. BEULQUE	FONTENAILLE Théodore
BIODRAG : Biopolymer-induced drag reduction: a promising technique to minimize water and electricity wastes in water pumping systems	CEMEF/CMM		A. SOEIRO PEREIRA, E. HACHEM, B. FLIGUIUZZI	EL KHOURY Ricardo

Tableau 1 : Thèses et post-doc financés par l'Institut en 2023 (le financement des projets de thèse et de post-doc se fait à la suite d'un processus d'appel à projets).

Le doctorat labellisé TTI.5

En plus des thèses financées par l'Institut, de nombreuses thèses en cours ou à venir à Mines Paris - PSL rentrent dans les thématiques de recherche de TTI.5. Les doctorants, avec l'accord de leurs directrices et directeurs de thèse, peuvent candidater pour rejoindre le parcours. Cela leur permettra de les intégrer à la communauté TTI.5, de bénéficier de formation dédiée et leurs travaux seront mis en avant par l'Institut. Par exemple, The Transition Institute 1.5 organise un webinaire bimestriel réservé aux doctorants du parcours dans lesquels ils peuvent échanger sur leurs travaux avec des camarades de disciplines diverses. Une fois le parcours entièrement complété et la thèse soutenue, ils recevront le certificat de labellisation TTI.5.

➡ En 2023, The Transition Institute 1.5 comptait 35 doctorants labellisés TTI.5. Vous pouvez retrouver la liste complète des thèses labellisées sur notre site internet : <https://the-transition-institute.minesparis.psl.eu/actualite/les-theses-labellisees-tti-5/>

TÉMOIGNAGE



Alexandre PETTI, doctorant labellisé TTI.5 pour sa thèse intitulée «Modélisation de l'opération et de la dégradation des piles à combustible à membranes échangeuses de protons (PEMFC) pour la mobilité électrique lourde» qu'il soutiendra au centre PERSEE.

« TTI.5 représente pour moi l'opportunité de rencontrer des personnes souhaitant contribuer à la réduction de l'impact humain sur la planète à travers l'ensemble des disciplines que compte le monde scientifique. J'espère de tout cœur que le TTI.5 se développera au niveau de l'université PSL afin de renforcer cette communauté active dans l'apport de vraies solutions, notamment dans le domaine de l'énergie, aux niveaux technique, politique et économique avec pour point névralgique la limitation de notre impact sur les modifications du climat mondial. »

3.2.2 Contributions scientifiques

Conférences/Séminaires/Workshop :

1) Katherine ALVINO SAAVEDRA, Boutros GHANNAM, Maroun NEMER : « Estimation of the effective irradiance under shading scenarios : a performance analysis of PV Prod » (hal-03805555). Visual presentation during the WCPEC-8, 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Sep 2022, Milan, Italy.

2) K. ALVINO, N. ZALACHAS, B. GHANNAM & M. NEMER : « Sensitivity analysis of the estimation of module energy output under partial shading », Journée des doctorants ISMME, Mai 2023, Paris, France.

3) K. ALVINO, N. ZALACHAS, B. GHANNAM, M. NEMER & R. DA SILVA : « A Global Sensitivity Analysis Applied to a Photovoltaic Performance Tool », Visual presentation during the 40th European Photovoltaic Solar Energy Conference EU PVSEC, 18-22 Sep 2023, Lisbon - Portugal.

4) K. ALVINO, N. ZALACHAS, B. GHANNAM & M. NEMER : « Uncertainties of module tilt and orientation, distance between rows and albedo on photovoltaic performance modeling », Oral presentation during the 2023 European PV Performance Modeling Collaborative PVPMC Workshop, 8-9 Nov 2023, Mendrisio - Switzerland.

5) Eleni EFFRAIMOPOULOU, Julien JAXEL, Arnaud RIGACCI, Tatiana BUDTOVA : “Thermal superinsulating pectin aerogels” (oral presentation), 3rd International Conference on Aerogels for Biomedical and Environmental Applications, July 2023, Maribor, Slovenia.

6) GUILLOT, V., ASSOUMOU, E. : « Combined decarbonization of the European and North African power systems: an emphasis on hydrogen trade. Presented », 15th International Conference on Applied Energy, Qatar, Doha.

7) GUILLOT, V., ASSOUMOU, E. : « Techno-economic Assessment of Hydrogen Trade Between Europe and North Africa ». FAEE student workshop 2023, GAEL-UGA, Grenoble.

8) WALD Guillaume, GLACHANT Mathieu : « The Effect of Energy Saving Obligations (ESOs) on Residential Energy Use : Empirical Evidence from France », YEEES Young Energy Economists and Engineer Seminar, FAU, Nuremberg, Allemagne, 5-6/10/2023.

9) WALD Guillaume, GLACHANT Mathieu : « The Effect of Energy Saving Obligations (ESOs) on Residential Energy Use : Empirical Evidence from France », FAEE PhD Workshop, GAEL, Grenoble, France, 17-18/10/202.

10) WALD Guillaume, GLACHANT Mathieu : « The Effect of Energy Saving Obligations (ESOs) on Residential Energy Use : Empirical Evidence from France », Conférence Évaluation des Politiques Publiques (EPP), AFSE - DGT, Paris, France, 8/12/2023.

11) WALD Guillaume, GLACHANT Mathieu :

« The Effect of Energy Saving Obligations (ESOs) on Residential Energy Use : Empirical Evidence from France », Workshop in Energy Policy, UJI, Castellon de la Plana, Espagne, 14-15/12/2023.

12) Katherine ALVINO SAAVEDRA, Nicolas ZALACHAS, Boutros GHANNAM, Maroun NEMER : « Sensitivity analysis of a tool for the design of photovoltaic installations coupled to buildings and under shaded scenarios », (hal-04102460), TTI.5 Phd's seminar, Apr 2023, Paris, France.

13) Roblex NANA TCHAKOUTE : « Fine grained Energy Profiling of Programs », Présentation lors du séminaire interne du CRI le 20 novembre 2023.

14) Roblex NANA TCHAKOUTE : « Fine grained Energy Profiling of Programs », Présentation lors du séminaire CMM le 4 décembre 2023.

15) Roblex NANA TCHAKOUTE : « Fine grained Energy Profiling of Programs », Présentation lors du colloque JRAF à Grenoble le 13 décembre 2023.

16) Mohamed SAHAOUI : « Durabilité et cycle de vie de la machine électrique, au cœur des enjeux d'une transition bas-carbone », Présentation au jury 1A au Centre des matériaux, 21 Juin 2023, et au séminaire des doctorants au Centre OIE, 27 Juin 2023.

Publications / Working Paper :

1) GUILLOT, V., SIGGINI, G., ASSOUMOU, E., 2023 : « Interactions between land and grid development in the transition to a decarbonized European power system ». Article dans Energy Policy 175, 113470.

2) Thibault GOESSEL : « Caractérisation des solutions de réhabilitation bas carbone et analyse de l'impact de leur massification à l'échelle du parc de bâtiments français », Rapport d'avancement (fait en juin 2023, biblio + plan de thèse).

3) CABOT Clément : « The demand-side flexibility in liberalised power market: a review of current market design and objectives », Working Paper TTI.5, Septembre 2023.

Posters :

1) Inès BEN KHALED, Pierre DUBLANCHET, Hervé CHAURIS : « Fault's permeability enhancement during laboratory-scaled injection experiments », Les JDD, April 13, 2023, Fontainebleau, France.

2) Fabien BEZ, Emad JAHANGIR, Ahmed ROUABHI et Cong-Toan TRAN : « Optimisation du dimensionnement du système de récupération de l'énergie géothermique de surface ».

3) Lucas DESPORT, Angelo GURGEL, Jennifer MORRIS, Howard HERZOG, Yen-Heng Henry CHEN, Sandrine SELOSSE, Sergey PALTSEV : « Exploring the conditions and implications of deploying direct air capture at scale », Poster présenté au IAMC 16th Annual Meeting, Novembre 14 -16, 2023, à Venise, Italie.

4) Thibaut FEIX : « Adaptation des modèles de prospective à un changement de paradigme sociétal dans une approche de soutenabilité forte », Poster présenté pour l'HCERES, Octobre 14 -19,2023.

5) Thibault GOESSEL : « Caractérisation des solutions de réhabilitation bas carbone et analyse de leur massification à l'échelle du parc français », décembre 2023.

6) Roblex NANA TCHAKOUTE, Claude TADONKI, Petr DOKLADAL, Youssef MESRI : « Carbone-aware high-performance artificial intelligence », Poster présenté à 2 occasions le Workshop TTI.5 du 28 mars 2023 et aux évaluations HCERS au mois d'octobre 2023.

7) Mohamed SAHAOUI : « Sustainability and life cycle of the electric machine, at the heart of the challenges of a low carbon transition », Poster du sujet de thèse lors de la Solar Winter School 2023 à Sophia-Antipolis.

Autres :

1) WALD Guillaume : Interview pour l'UMR CNRS I3 : « Guillaume Wald est lauréat du prix du meilleur article doctorant en économie de l'énergie décerné par l'Association des Economistes de l'Energie (AEE) », 8 décembre 2023.



Présentation de doctorants lors du premier Workshop TTI.5 - ©TTI.5

4. Rétrospective sur nos ÉVÈNEMENTS

4.1 Agenda de l'année 2023

JANVIER

6 Intervention de Nadia MAÏZI à la **conférence « Changement climatique, sciences, sociétés, politique »**, à l'Institut Pierre-Simon Laplace, à Paris et coorganisée par le Centre Alexandre-Koyré (EHESS-CNRS) et l'ENS (CERES).

19 **Webinaire TTI.5 #3** « Hydrogène-Énergie » ([lien](#))

27 Publication de la **Note d'éclairage #5 « Decoding the IPCC scenarios C1 to C8 »** ([lien](#))

MARS

4 Intervention de Nadia MAÏZI à la **conférence « Regards croisés sur le changement climatique. La Réunion au défi du réchauffement climatique et de la protection de la biodiversité »**, organisée à l'Université de La Réunion.

15 Intervention de Nadia MAÏZI aux **Journées scientifiques de l'environnement « La sobriété dans tous ses états »**, organisées conjointement par l'Université Paris-Est Créteil et le Département du Val-de-Marne.

18 Intervention de Nadia MAÏZI au **Colloque annuel international « L'énergie : bien commun de l'humanité ? »**, organisé par la Fondation Gabriel Péri, à Paris ([lien](#))

21 **Webinaire TTI.5 #4** « Transition écologique dans le secteur du bâtiment » ([lien](#))

23 Intervention de Nadia MAÏZI à l'**Académie du Climat** à Paris « **Comment dialoguer sur nos transformations futures ?** » ([lien](#))

28 **1^{er} Workshop TTI.5**, journée de rencontre interne, réservée aux chercheurs de l'École ainsi qu'aux doctorants du parcours TTI.5 ([lien](#))

29 Intervention de Nadia MAÏZI dans le cadre du **séminaire « Connaître, anticiper, s'adapter aux changements climatiques : quels enjeux pour la France ? »**, organisé en ligne par l'IRIS.

AVRIL

3 Intervention de Nadia MAÏZI à la **conférence MOMI2023 « Le Monde des Mathématiques Industrielles »** organisé par l'INRIA de l'Université Côte d'Azur, à Sophia Antipolis.

MAI

17 **Webinaire TTI.5 #5** « Prospective et approches de longs termes des changements climatiques » ([lien](#))

31 **1^{er} Forum TTI.5 « Enjeux Sécuritaires des Changements Climatiques »**, à la Maison de l'Océan à Paris ([lien](#))

31 Remise du **1^{er} Prix TTI.5 de la controverse environnementale**, à Maud ROUX-SALEMBIEN, pour sa présentation « Bette-raves, oiseaux et néonicotinoïdes » ([lien](#))

JUIN

13 Intervention de Nadia MAÏZI au sein de la **Conférence « Changement climatique en Afrique »** organisée par Agropolis fondation et le CIRAD, à Montpellier ([lien](#))

19 Publication de la **Note d'éclairage #6 « La politique énergétique polonaise sous contrainte sociale et géopolitique »**, par Léopold MOENE-CLAEY ([lien](#))

19-28 **Déplacement de Nadia MAÏZI au Sénégal** dans l'objectif de nouer des partenariats universitaires et institutionnels

JUILLET

18 Publication de la **Note d'éclairage #7 « La réforme de l'assurance récolte en France »**, par Damien CAPÉRAA et Lucille LACOSTE ([lien](#))

AOÛT

18 Publication de la **Note d'éclairage #8 « L'exploitation minière des fonds marins : un débat houleux »**, par Théophile CANDELA ([lien](#))

SEPTEMBRE

12 Publication du **Working Paper TTI.5 #1**, par Clément CABOT : « The demand-side flexibility in liberalised power market: a review of current market design and objectives » ([lien](#))

18 Intervention de Nadia MAÏZI au **Séminaire de rentrée de la Direction générale des entreprises** organisée à Bercy.

19 **Webinaire TTI.5 #6** « Villes durables », événement inscrit dans le cadre des **conférences de rentrée scientifique de l'Université PSL** ([lien](#))

NOVEMBRE

6-11 **International Autumn School on « Prospective Modeling and Climate Change: Energy & Water issues »**, avec le CMA Mines Paris – PSL et l'ETSAP ([lien](#))

8 **Soutenance de thèse de Clément CABOT**, du CERNA Mines Paris – PSL, premier doctorant labellisé TTI.5 à valider entièrement le parcours doctoral TTI.5 ([lien](#))

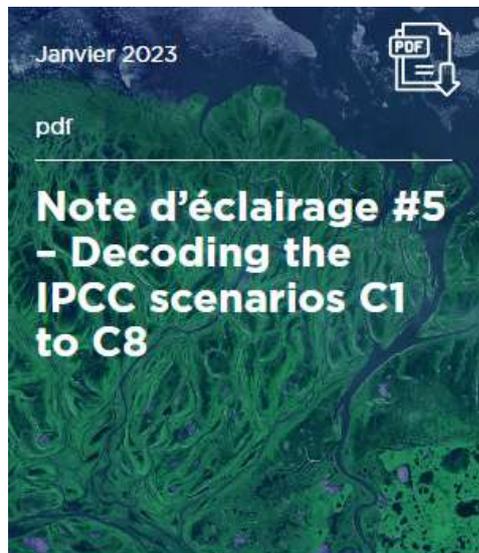
21 Guillaume WALD, doctorant TTI.5 (CERNA et CES Mines Paris – PSL), remporte le **Prix du meilleur « Article doctorant en économie de l'énergie »** décerné par l'AEÉ (Association des Économistes de l'Énergie) ([lien](#))

28 Intervention de Nadia MAÏZI à la **Convention des Entreprises pour le Climat**, à Paris.
&
Webinaire TTI.5 #7
« Santé et Climat : une liaison dangereuse ? »
([lien](#))

DÉCEMBRE

10-11 **Participation d'une délégation TTI.5 à la COP28**
à Dubaï via la Chaire Modélisation Prospective au service du Développement Durable
([lien](#))

20 Publication de la **Note d'éclairage #10** « Hydrogène, le cas particulier des poids lourds », par Clara ALLOIS et Pierre FRODÉ DE LA FORÊT ([lien](#))



The Transition Institute 1.5
L'ambition d'une véritable transition

SÉMINAIRE TTI.5
SÉANCE 3 : HYDROGÈNE-ÉNERGIE
JEUDI 19 JANVIER 2023 À 13H30 (EN LIGNE)

MINES PARIS | PSL

©TTI.5



4.2 Retour sur le 1er Forum TTI.5 : « Enjeux sécuritaires des changements climatiques »



S. Joannès © Frédérique Toulet

En mai 2023, The Transition Institute 1.5 a eu l'immense honneur d'organiser son tout premier **Forum annuel sur le thème des « Enjeux sécuritaires des changements climatiques »**, une journée de présentation de travaux de recherche de différents spécialistes reconnus. Cet événement garantit une certaine visibilité pour l'Institut et assure sa notoriété auprès du milieu scientifique, des décideurs publics et des entreprises.

« Je me félicite de la tenue du premier Forum TTI.5. Un an après la création de l'Institut, la réussite de cet événement nous encourage plus que jamais à poursuivre notre mission de formation et d'information dans l'objectif d'une transition bas carbone »

Nadia Maïzi, Directrice de TTI.5

Cette journée d'échanges s'est organisée en trois temps. Le premier temps dédié aux « Controverses », a été marqué par la remise du **Prix TTI.5 de la controverse environnementale** au groupe d'étudiants en 3e année de Cycle ingénieur civil à Mines Paris – PSL qui a travaillé sur le projet de controverse « Betteraves et néonicotinoïdes : to bee or not to beet ? », brillamment présentée par **Maud Roux-Salembien**.

Le deuxième temps du 1er Forum TTI.5 était consacré aux « Solutions ». **Luc Teerlinck**, Responsable innovation et business model de transformation chez **Decathlon**, a présenté le projet de location de matériel « We Play Circular », un modèle de business durable en phase de test très prometteur. **Franck Aggeri**, Professeur au **CGS Mines Paris – PSL**, a présenté son dernier essai : « L'Innovation, mais pour quoi

faire ? Essai sur un mythe économique, social et managérial ». Une réflexion sur l'injonction à l'innovation.

Enfin, le troisième temps du 1er Forum TTI.5 fut l'occasion de réfléchir aux « Enjeux sécuritaires des changements climatiques ». **Sofia Kabbej**, Chercheuse au sein du Pôle Climat, Énergie et Sécurité de l'**IRIS** (Institut de Relations Internationales et Stratégiques), a consacré sa présentation aux risques qu'entraîne la géo-ingénierie, c'est-à-dire les techniques visant à la modification de l'environnement terrestre, et plus particulièrement celles visant l'atténuation des effets des changements climatiques. Le Conseiller d'agriculture auprès de l'**Ambassade des États-Unis en France**, **David Leishman**, a rappelé l'importance de la diversité des acteurs impliqués dans la transition agricole. **Gonéri Le Cozannet**, Chercheur au sein de l'Unité risques

côtiers et changement climatique au **BRGM** et co-auteur du 6e rapport du **GIEC**, a détaillé les risques de conflits et les adaptations aux changements climatiques qu'évoque le 6e rapport du GIEC. **Katrin Millock**, Directrice de recherche **CNRS** et Professeure à **Paris School of Economics**, s'est concentré sur la problématique des déplacements de population.

En conclusion, **Cédric Denis-Rémis**, Vice-président Développement et Innovation de l'**Université PSL**, et **Marie Roussie**, Ingénieure de recherche, ont présenté deux scénarios issus des travaux de l'équipe Université PSL de la **Red Team Défense**.



G. Le Cozannet © Frédérique Toulet



© Frédérique Toulet



S. Kabbej © Frédérique Toulet

Gonéri Le Cozannet a réalisé une intervention remarquée lors du 1er Forum TTI.5, consacrée aux risques et aux conflits entraînés par les changements climatiques, et aux adaptations nécessaires, tels qu'évoqués au sein du 6e rapport du GIEC dont il est co-auteur principal. Gonéri Le Cozannet est également chercheur au sein de l'Unité risques côtiers et changement climatique au BRGM.

« Le sujet des conflits et du changement climatique, qui n'est pas ma spécialité, est très mal posé dans le débat public. On pense immédiatement à des conflits armés entre pays, dont la probabilité augmente certes avec le réchauffement climatique. Mais en réalité, le risque immédiat est bien davantage celui de conflits sociaux, motivés par une augmentation de la demande sociale en faveur de politiques climatiques ambitieuses d'une part, de l'autre par une réaction qui s'organise pour retarder autant que possible les transformations en faveur du climat.

« Un exemple frappant est celui de la gestion de l'eau en France : bien avant que le terme de « mégabassine » n'ait été inventé, le GIEC alertait sur le fait qu'une politique d'adaptation centrée sur l'offre et le stockage d'eau peut créer des

inégalités entre usagers, a des effets négatifs pour les écosystèmes et représente un investissement conséquent pour les acteurs qui les finance. Face à cela, le GIEC met en avant les avantages d'une adaptation qui considère également des politiques orientées demande (efficacité et sobriété des usages de l'eau), notamment pour réduire les conflits entre usagers. Il y a ici une opportunité dont certains acteurs se sont emparés, notamment ans les agences de l'eau, mais qui n'est pas aujourd'hui la trajectoire d'adaptation dominante en France. Si l'on suit le chapitre 18 du 6e rapport, on comprend que ce type de conflit ne fera qu'augmenter tant que l'action en faveur du climat sera limitée.

« Concernant The Transition Institute 1.5, j'ai immédiatement adhéré à son intitulé qui rappelle l'impératif à ne pas démissionner de l'objectif d'une augmentation de la température globale de 1,5 degré au-dessus de l'ère préindustrielle, fixée par l'Accord de Paris en 2015. Certes, nous savons aujourd'hui qu'il sera extrêmement difficile d'éviter un dépassement, mais nous savons aussi que limiter au maximum ce dépassement en amplitude et en durée se traduira par des morts prématurées évitées et des dommages évités pour l'économie, la santé et la biodiversité. »

4.3 Retour sur nos actions à l'International

4.3.1 Participation à la Conférence des Parties (COP28) au Émirats Arabes Unis



© UAE Government

En décembre 2023, une délégation de Mines Paris s'est rendue aux Émirats arabes unis pour la 28e **Conférence des Parties (COP) de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (UNFCCC)** par le biais de la **Chaire Modélisation Prospective au service du Développement Durable (Chaire MPDD)**, pilotée par le **CMA Mines Paris - PSL**. Cette délégation comprenait 3 membres de l'Institut TTI.5, dont sa directrice.

Ainsi, pour la deuxième année consécutive, nous avons pu représenter l'Institut au sein de la « **Blue-zone** » en tant qu'observateurs. C'est dans cette zone que se tiennent les réunions officielles, les négociations, et les conférences de presse, mais aussi où sont organisées de nombreuses conférences scientifiques.

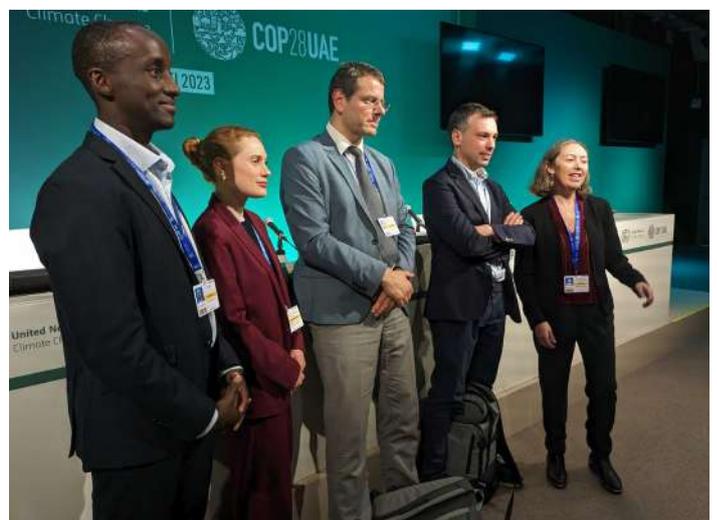
Nous y avons tenu un **stand** pendant 2 jours durant lesquels nous avons pu présenter l'Institut et échanger avec des diplomates, des cadres dirigeants, des collègues chercheurs et des représentants d'associations.

La chaire MPDD y a organisé un **Side Event** intitulé « **Global energy transition and local realities: vulnerabilities, development, mitigation, trade-offs** » avec les interventions de Edi ASSOUMOU (CMA Mines Paris - PSL, France), Charlène BARNET (CMA Mines Paris - PSL, France), Mohamadou FADEL DIOP (OXFAM, Sénégal), Amit GARG (IIMA, Inde), Franck LECOCCQ (CIRED, France) et Joana PORTUGAL (COPPE-UFRJ, Brésil).

Retrouvez la rediffusion de cet événement sur la chaîne YouTube de l'UNFCCC : <https://www.youtube.com/watch?v=wPPOxGazu38>



Notre stand dans la «Blue-Zone» © TTI.5



Les intervenants du Side Event de la Chaire MPDD © TTI.5

Les COP étant des lieux d'échanges culturels multirégionaux incomparables, l'équipe TTI.5 avait également pour mission d'assister à des événements organisés par des **chercheurs, ONG et gouvernements de pays Africains** et portant sur les enjeux de leurs pays. En effet, le **Forum 2024 de l'Institut** portera sur les « Regards Africains sur les changements climatiques », la COP était donc une bonne occasion de mieux comprendre les sujets clés et les points de tensions qui traversent les pays africains sur la question de la transition et d'identifier des intervenants potentiels. Les sujets qui sont ressortis souvent lors des discussions sur les aspects d'atténuation sont : le **dilemme développement - atténuation**, la **dépendance aux énergies fossiles**, la **souveraineté économique** des pays et les enjeux économiques pour une **transition juste**, et enfin les conséquences des **industries extractives** sur la qualité de vie des populations. Les sujets étaient également très concentrés sur les thématiques de **l'adaptation**, notamment sur le fonds de pertes et dommages, le transfert de technologies et le financement.



© TTI.5

Pour une analyse des enjeux de l'accord qui a été adopté à Dubaï, retrouvez une interview de la directrice de l'Institut ici : <https://www.lesechos.fr/monde/enjeux-internationaux/il-faut-absolument-un-travail-de-suivi-apres-une-telle-cop-2041272>

TÉMOIGNAGE



Charlène BARNET, doctorante au CMA Mines Paris - PSL, qui débute sa deuxième année de thèse sur la modélisation prospective de long terme de trajectoires de transition énergétique pour la région Moyen-Orient et Afrique du Nord, a demandé la labellisation dès l'année du lancement de l'Institut. Une démarche qui lui permet d'être pleinement incluse dans la communauté TTI.5.

« Faire labelliser ma thèse par TTI.5 me donne l'opportunité d'être intégrée au sein d'un réseau d'étudiants, de doctorants et de chercheurs dynamiques et convaincus par la nécessité d'aborder la thématique de la transition écologique de façon systémique. Cela me donne accès à des conférences thématiques, échanges et séminaires qui me permettent d'acquérir des connaissances et compétences supplémentaires. Je peux communiquer sur l'avancement de mes travaux sous diverses formes et obtenir des retours constructifs et des conseils de la part de la communauté TTI.5.

Je me suis rendue à la COP 28 de Dubaï afin de participer à un Side Event officiel dont la thématique est « Transition énergétique mondiale et réalités locales : vulnérabilités, développement, atténuation, compromis » en tant qu'intervenante. Cette conférence a eu lieu le vendredi 8 décembre 2023 et a été l'occasion pour moi de discuter des thématiques au cœur de mon sujet de thèse. J'ai également pu assister à de nombreuses présentations traitant de questions clés pour mes travaux de recherche mais également rencontrer les représentants des différents laboratoires et institutions opérant dans la région. »

4.3.2 Séjour de recherche au Sénégal

La directrice de l'Institut ainsi qu'une collaboratrice de TTI.5 se sont rendues au Sénégal en juin 2023 afin de rencontrer les **acteurs locaux de la lutte contre le changement climatique**. Elles ont pu échanger avec des personnalités du **gouvernement** (Ministère de l'Environnement et de la transition Ecologique), des auteurs du **GIEC**, des acteurs d'**agence de développement** (ANRSA, IUCN, AFD), des **chercheurs de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar** (UCAD), ainsi que des acteurs d'**institutions** et d'**ONG** (NRGI, GGGI, ENDA, OXFAM etc.).



Les observations et constats de ces interlocuteurs ont porté sur les **impacts** et l'**adaptation** ainsi que sur la **transition énergétique**. Sur le premier sujet, il en ressort que l'adaptation est déjà en cours et reste la priorité. Les impacts et conséquences du changement climatique sont déjà très forts et visibles ces dernières années :

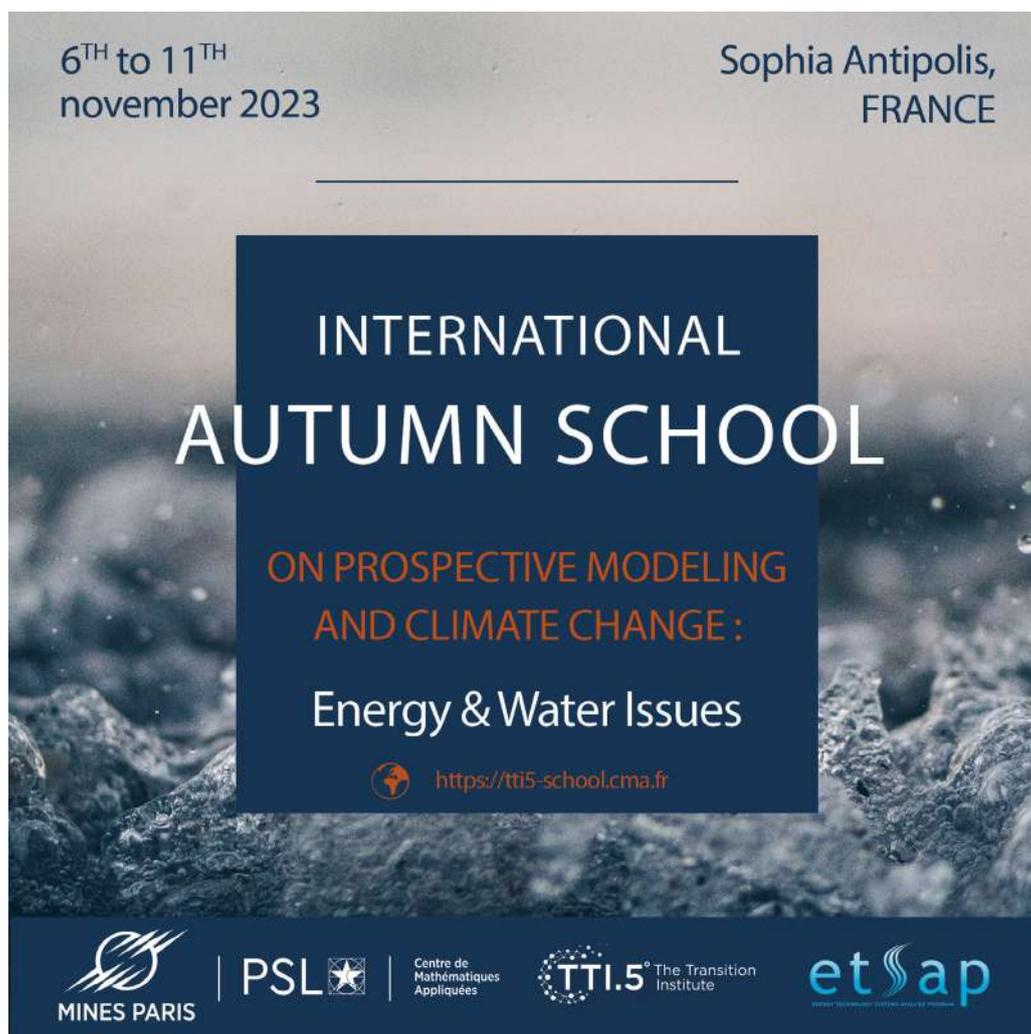
- **Submersion des côtes, sécheresse, inondations** des pôles urbains, baisse des **rendements agricoles**, dégradation des **écosystèmes** et des **conditions sanitaires**
- La presqu'île de Dakar concentrant 1/3 de la population nationale, 70% de l'activité économique sur 3% de la surface nationale dans des conditions de **pollution** maximale
- **Migrations**, pêcheurs
- **Muraille verte** : une solution ou un mirage ?

Sur les questions de transition énergétique, les discussions se sont tournées vers les **enjeux de droit à l'exploitation des ressources** de gaz/pétrole, les questions de **responsabilités et d'éthique des entreprises pétrolières internationales**, ainsi que sur l'extraction des **minéraux critiques** (et autres) : modes de production respectueux de l'environnement et des communautés locales, partenariat avec les entreprises minières internationales.

Ce voyage aura permis de rencontrer une communauté riche d'acteurs et les échanges auront inspiré la thématique du prochain forum de l'Institut « **Regards Africains sur les changements climatiques** ».



4.3.3. Organisation d'une Autumn School internationale



L'institut organise une semaine de formation internationale de type « *Autumn School* » ou « *Summer School* » (école d'été) en collaboration avec un ou plusieurs centres de l'École, différent chaque année. L'objectif est de mettre en avant, de partager et de diffuser l'expertise de ces centres vers un public international.

La première édition a été organisée en 2023 en collaboration avec le Centre de Mathématiques Appliquées (CMA). Durant une semaine, nous y avons proposé une formation à la famille de modèles du système énergétique TIMES et aux enjeux croisés eau-énergie : « **International Autumn School on Prospective Modeling and Climate Change : Energy and Water Issues** ». Cet événement a permis de rassembler près de 20 nationalités différentes sur le **Campus de l'École des Mines de Paris à Sophia Antipolis**, avec 19 intervenants et 31 participants.

Les trois premiers jours ont été consacrés à des conférences sur les **défis de la modélisation prospective**, sur les **enjeux des systèmes énergétiques** et sur le **nexus eau-énergie**, ainsi que sur la famille de modèles TIMES.

Nous avons également organisé des exercices pratiques permettant aux participants de se familiariser avec le **modèle TIMES**. Les étudiants ont travaillé en groupe sur un projet d'étude prospective tout au long de la semaine et de façon plus intense les deux derniers jours. La demi-journée finale a été consacrée aux présentations orales des projets. Les doctorants du parcours doctoral TTI.5, ont quant à eux, participé à un atelier de deux jours sur la **communication scientifique**. Un moment très apprécié par tous les participants.

La semaine de l'International Autumn School a été ponctuée de temps de sociabilité et de découverte de la région. Un grand dîner a notamment été organisé au cœur de la vieille ville d'Antibes, situé à quelques kilomètres du Campus. De plus, l'ensemble des participants, des intervenants et de l'équipe d'organisation ont été invités à participer à la découverte commentée du **Musée océanographique de Monaco**, puis à une visite guidée de Nice, capitale de la Côte d'Azur, où le thème de la gestion de l'eau a été abordé.

TÉMOIGNAGES



Kangkanika NEOG, qui travaille au sein du CEEW (Council on Energy, Environment and Water) en Inde, a assuré plusieurs présentations de ses recherches durant l'International Autumn School. Elle est une experte reconnue pour la politique de l'eau, la gestion durable de cette ressource et sa gouvernance.

« L'International Autumn School a été une expérience très enrichissante pour moi. J'ai vraiment apprécié mes échanges avec tous ces chercheurs travaillant dans le domaine de l'énergie et de l'eau. J'ai pu discuter facilement avec eux des questions intersectorielles, de politiques publiques en partageant spécifiquement les expériences de l'Inde. C'était également merveilleux de rencontrer de nombreuses personnes passionnées par leur domaine de recherche. De plus, les nombreuses activités de découverte de la région étaient également excellentes. »



Tania LOUIS a assuré les ateliers de communication scientifique durant l'International Autumn School. Docteure en virologie, elle est devenue en 2016 médiatrice scientifique et conceptrice de contenus pédagogiques

« Communiquer efficacement sur ses travaux et sur l'état des connaissances dans son domaine est une compétence importante pour tous les personnels de recherche. Il me semble donc essentiel d'y former un maximum de chercheurs. Mais elle est d'autant plus primordiale pour celles et ceux travaillant sur des thématiques qui concernent les citoyens de façon directe, comme le changement climatique. Outre leurs proches, ces chercheurs seront potentiellement amenés à communiquer avec des collègues d'autres disciplines, mais aussi des journalistes et des décideurs ! Se mettre à la place d'une audience non experte et construire un discours intelligible pour transmettre un message, cela s'apprend. Je suis toujours ravie d'accompagner les personnes qui souhaitent se former dans ce domaine, et le contexte de l'IAS était particulièrement intéressant : le format relativement long laissait le temps d'entrer dans un certain niveau de détails, tout en réalisant des mises en application. Par ailleurs, le profil des participants et participantes à la formation en fait de potentiels acteurs des prises de décision de demain. A ma modeste échelle, je trouve essentiel de leur donner toutes les clefs possibles pour que leurs compétences permettent des choix plus éclairés et reposant sur des bases scientifiques solides dans le futur. »



Áine GREENE, Chercheure associée au CGEP (Center on Global Energy Policy) de l'Université de Columbia aux États-Unis, a apprécié sa participation comme élève de l'International Autumn School.

« Je travaille actuellement avec le modèle TIMES pour un projet sur le rôle de l'hydrogène dans la décarbonisation du secteur électrique de l'Irlande, pays dont je suis originaire. Je prévois d'appliquer ce que j'ai appris durant cette semaine de formation pour utiliser plus efficacement TIMES, afin d'éclairer un dialogue basé sur les données pour ouvrir la voie à une réalité future sûre et durable. »



Thomas Gaël BEBGA est ingénieur statisticien et économiste de l'énergie au sein du ministère de l'Économie du Cameroun, où il participe à la gestion, au suivi et à l'évaluation des projets d'investissements du gouvernement dans le domaine des infrastructures.

« J'ai choisi de participer à la semaine de formation de l'Internationale Autumn School, car je souhaitais améliorer mes compétences dans les méthodologies clés afin d'élaborer des politiques de transition énergétique compatibles avec les enjeux climatiques et hydriques. Une compétence qui me sera utile pour mes travaux de recherche que j'effectue à l'Université de Dschang, basés sur les scénarios à faibles émissions de carbone et le développement économique en Afrique. »



Remise des diplômes aux participants en fin de formation © TTI.5

5. Presse et médias

FÉVRIER 2023

3 **Emploi Environnement** : Le « réveil écologique » de la formation bat son plein ([lien](#))

12 **Le Monde** : « Réduire la demande a un impact sur la diminution des émissions de gaz à effet de serre » ([lien](#))



Le Monde

MARS 2023

20 **Les Échos** : « Les gouvernements ne sont pas à la hauteur » ([lien](#))

Les Echos

JUIN 2023

7 **Era Environnement (podcast)** : « Nous sommes d'incorrigibles optimistes » ([lien](#))

ERA ENVIRONNEMENT

DÉCEMBRE 2023

13 **Les Échos** : « Il faut absolument un travail de suivi après une telle COP » ([lien](#))



6. Rapport par Axes de recherche TTI.5

6.1 Axe 1 : Le design de la transition



6.1.1 Description et objectifs de l'axe

Conception de la transition

Le premier volet de cet axe de recherche cherche à déplier les mécanismes et les dynamiques des transitions. Son objet est de permettre l'identification des mécanismes et processus qui contribuent au déclenchement et à la réalisation d'une décarbonation forte et rapide.

L'une des déclinaisons de cet axe repose sur l'élaboration de modèles de la transition afin d'adosser nos analyses et réflexions sur un cadre clarifié. Les modèles s'inspireront d'analogies, par exemple avec la physique des transitions de phase, ou pourront dériver d'analyses rétrospectives, etc. Cela doit nous permettre de définir des objectifs clairs et d'évaluer l'état effectif de la transition des systèmes techniques, sociaux, économiques, politiques et les conditions de leur bifurcation vers un système décarboné.

Ingénierie de la transition

Dans ce volet, nous questionnons les solutions bas-carbone et leur environnement régulateur, à savoir, les leviers financiers et les politiques publiques associés à cette transition (investissements, taxes, redistribution, subventions) qui devraient initier puis conduire le processus de décarbonation. Il s'agit de considérer à la fois des pistes de solutions qui portent sur la décarbonation de la production (énergies vertes, capture du CO₂, etc.) et des pistes de solutions reposant sur la modification de la consommation (sobriété, efficacité, etc.). Pour éviter que les solutions

Le second volet propose de se consacrer à l'étude de la nature du mouvement et des formes d'organisations qui pourraient permettre de concrétiser cette transition vers un inconnu désirable. La démarche peut s'inspirer des enseignements tirés de contextes différents, comme par exemple celui des semi-conducteurs, où la loi de Moore a conduit à interroger les modèles et organisations pour repenser nos usages des semi-conducteurs et d'éventuelles alternatives, en prenant en compte les difficultés liées aux complexités des chaînes d'approvisionnement mondialisées et les problèmes de disponibilité des ressources. Ce travail doit nous permettre de réfléchir aux nouvelles formes organisationnelles et de gouvernance adaptée pour conduire les transitions souhaitées.

des uns ne deviennent les problèmes des autres, ces solutions seront toujours évaluées à travers différents prismes disciplinaires, temporels et spatiaux, et dans leur interaction et leur intégration aux systèmes économique, énergétique, politique et social.

Par exemple, les solutions technologiques concernant le bâti seront discutées relativement à leur intégration au système énergétique à différentes échelles, aux questions de consommation associées (autoconsommation, externalité du numérique), d'utilisation de

nudges, de matériaux isolants, d'équipements des ménages, de comportement, de politique, de norme, de subvention, de compétitivité, etc. Pour ce qui relève de l'intégration des techniques de captage, stockage et valorisation du CO₂ (CCUS) ou de l'utilisation de l'hydrogène dans la reconfiguration du secteur industriel,

on abordera à la fois les enjeux techniques, mais aussi les enjeux de l'acceptabilité, les conséquences géopolitiques de réorganisation des filières, les politiques industrielles de déploiement des technologies elles-mêmes, etc.

6.1.2 Paroles de chercheurs

Enjeu crucial, la question du design de la transition interroge à la fois ce que les différents acteurs définissent comme étant cette transition pour pouvoir examiner les options qui pourraient nous conduire à un avenir souhaitable partagé. En outre, si la transition est motivée par le dérèglement climatique, elle l'est également par ses corollaires : les bouleversements de la biodiversité, les questions liées à la santé humaine et aux limites planétaires sont également à prendre en compte, ainsi que les aspects économiques et sociaux. Ce qui rend encore plus délicate sa définition puisqu'elle

doit se faire à différentes échelles et dans les différents secteurs d'activité, tout en veillant à ce que la réconciliation des actions déclinées en silo soit encore pertinente.

Il s'agit pour nous chercheurs d'évaluer s'il faut appliquer une approche systémique du design ou bien s'il faut introduire des contributions plus spécifiques, plus spécialisées et se demander comment elles s'articulent. Démêler cet enchevêtrement constitue un défi qui motive particulièrement notre engagement dans cet axe.

6.1.3 Focus thématique

Nous proposons un focus sur la thèse de Dhekra Bousnina (doctorante labellisée) « Du smart grid aux systèmes intelligents multi-énergies » soutenue en décembre 2023.

Cette thèse propose une approche de gestion de l'énergie basée sur l'Apprentissage par Renforcement Profond (DRL) pour les Systèmes Multi-Énergies Intelligents (SMEI). Le Système de Gestion Multi-Énergies Intelligente (SGMEI) est conçu pour optimiser la gestion des flexibilités dans les SMEI, y compris les systèmes de stockage de chaleur, de froid et d'électricité, ainsi que les systèmes de production dans les réseaux de chaleur et de froid, comme les Thermo-Frigo Pompes (TFPs). On propose ainsi l'application de cette approche sur l'étude de cas du projet Meridia Smart Energie (MSE), un projet réel de SMEI en cours de construction dans l'écoquartier de Nice Meridia, en France. L'agent DRL développé est comparé à un Contrôleur Prédicatif (MPC) sur un premier cas

d'étude simulé de SMEI, montrant que le DRL est capable d'approcher l'optimum théorique du MPC (à hauteur de 98%) en termes de réduction des coûts énergétiques. Cette étude suggère que le DRL est une approche prometteuse pour la gestion énergétique optimisée des SMEI. L'approche DRL est également appliquée sur un second cas d'étude à un jumeau numérique plus détaillé de MSE, développé sous Dymola (langage Modelica), pour valider ces résultats sur un second cas d'étude plus complexe. Les futurs travaux porteront sur le transfert de l'apprentissage de la simulation à la réalité sur MSE et étendront l'application de cette approche à de nouveaux cas d'usage de SMEI. Sa thèse a fait l'objet d'une publication de rang A, l'article "**Deep Reinforcement Learning for Optimal Energy Management of Multi-energy Smart Grids**" par D. Bousnina et G. Guerassimoff, paru en 2022 dans la revue *Lecture Notes in Computer Science*.

6.1.4 Fait marquant

Laurent AUBANEL, doctorant au centre des Matériaux de Mines Paris, et au sein du parcours de labellisation TTI.5, a soutenu sa thèse en

2023. Son travail a été récompensé par le Premier Prix Bodycote de la Société Française de métallurgie et de Matériaux.

Laurent nous résume brièvement ses travaux :
« Le design de la transition peut s'exprimer de deux manières. Une transition douce ou radicale. Les deux approches sont à mon sens complémentaires, car applicables à des horizons différents. Dans l'automobile, cela peut s'illustrer par l'émergence de la voiture électrique qui nécessite le développement de technologies radicalement différentes, et l'amélioration des véhicules thermiques qui constitue la manière douce et rapidement applicable. Ma thèse, dont l'objectif est de réduire le frottement des moteurs thermiques, s'inscrit dans la deuxième catégorie.

Pour bien comprendre les enjeux, il faut avoir quelques chiffres en tête. L'automobile représente 10,2% des émissions de CO₂ mondiales, et il s'avère que 5,2% de celles-ci sont uniquement générées par le frottement des pistons dans les cylindres des moteurs thermiques. Ce frottement est donc responsable de 0,53% des émissions mondiales, soit 190 millions de tonnes de CO₂ chaque année. Sa réduction est étudiée depuis plus de 30 ans par tous les groupes automobiles, ce qui a mené aux développements de différentes technologies. Le retour d'expérience de ces technologies et l'émergence de nouveaux procédés, dans mon cas le cold spray, m'a permis de tirer le

meilleur parti de ses décennies d'ingénierie et de designer une transition pour rendre plus sobres les moteurs thermiques de demain. Dans ma thèse, des revêtements composites acier/acier sont mis en œuvre par cold spray et leur finition de surface permet de créer une topographie avec des protubérances. Lors du frottement de ces revêtements dans une huile de moteur, leur topographie entre en synergie avec les additifs de l'huile pour former un film épais tout autour des protubérances. Ce film garantit une protection totale face à l'usure et permet d'atteindre un coefficient de frottement extrêmement faible. Cette innovation permet d'obtenir une réduction de 35% du frottement des pistons dans les cylindres par rapport aux moteurs thermiques de dernière génération actuellement en circulation, et ainsi d'envisager une baisse allant jusqu'à 0,14% des émissions mondiales, soit 50 millions de tonnes de CO₂ par an.

Ce design innovant, et les résultats qu'il apporte, m'ont permis de décrocher le prix HIRN, récompensant la meilleure thèse de tribologie (science du frottement) de l'année, et le prix Bodycote SF2M, honorant des travaux sur les matériaux métalliques et les traitements de surface. »

6.1.5 Conclusion et propositions pour l'avenir

Dans la continuité des travaux de la chaire Théorie et Méthodes de la Conception Innovante (TMCI), Sophie Hooge, Pascal Le Masson, Blanche Segrestin et Benoit Weil lancent le Bauhaus des Transitions.

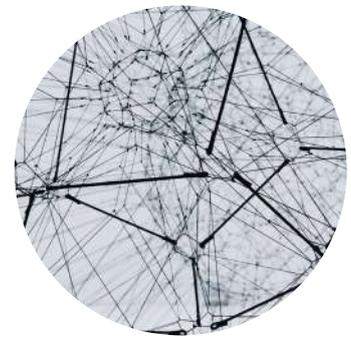
« Le 15 octobre 2020, la présidente de la commission européenne invitait à développer de nouveaux Bauhaus s'inspirant de la célèbre école de conception créée en Allemagne en 1919, pour faire face aux transitions contemporaines (environnement, santé, mobilité, matériaux, énergie, agro-alimentaire). Le projet Bauhaus des Transitions – Management de l'inconnu et Sciences de Gestion Conceptive de Mines Paris-PSL - vise à développer un de ces Bauhaus

du XXI^e siècle pour les cadres, dirigeants, scientifiques et fonctionnaires qui inventent aujourd'hui une gestion plus conceptive face aux défis et aux risques contemporains. Ce Bauhaus des Transitions veut être le laboratoire d'une école du management de l'inconnu que plusieurs acteurs socio-économiques appellent de leurs vœux »¹

Il s'agit d'un programme de formation et de recherche sur le management de l'inconnu et les sciences de gestion conceptives. Nous suivrons avec grand intérêt le déploiement de cette nouvelle initiative dont l'inauguration aura lieu le 13 mars 2024 à Mines Paris - PSL (60 boulevard Saint-Michel, 75006 PARIS).

1. Toutes les informations sur cette initiative sont disponibles ici : <https://bauhausdestransitions.minesparis.psl.eu/inscription/>

6.2 Axe 2 : Une planète électrique ?



6.2.1 Description et objectifs de l'axe

Description

Cet axe de recherche est dédié à interroger la pertinence d'une vision régulièrement présentée comme une orientation souhaitable, voire incontournable pour la transition : le déploiement du vecteur électrique. Il s'agit d'explorer les enjeux inhérents à l'électrification et ainsi proposer de définir les conditions techniques, sociales, organisationnelles et politiques, ainsi que les modalités de mise en place de trajectoires, qui soient porteuses d'une transition bas-carbone aux différentes échelles.

Cela nécessite d'explorer les trajectoires technologiques et les trajectoires de consommation compatibles avec une électrification décarbonée. À ce titre, il faut s'intéresser aux enjeux opérationnels pour le système électrique, aux technologies de production, aux vecteurs et aux ressources énergétiques, ainsi qu'aux modes de vie. Nous proposons également d'explorer les leviers économiques et politiques permettant de mettre en œuvre des trajectoires identifiées. Pour s'assurer de la cohérence et de l'applicabilité des mesures, projets et solutions analysées, les questions seront toujours abordées au regard d'enjeux d'accessibilité, d'appropriation sociale et d'acceptabilité, et nous proposerons des analyses multi-échelles permettant ainsi de prendre en compte les singularités régionales, les conditions géopolitiques, ainsi

que les différentes externalités, comme par exemple l'exportation des impacts (secteur du numérique, consommation de métaux rares, relocalisation, etc.).

Pour toutes les options envisagées, les recherches menées à l'Institut viseront à éclairer les tensions qui se nouent autour des choix énergétiques liés à l'électrification, via l'analyse de leurs impacts environnementaux (notamment via des analyses de cycle de vie), des enjeux liés à la gestion des ressources nécessaires pour suivre ces trajectoires, des questions sociopolitiques liées à ces choix, des modèles d'affaires associés à cette bifurcation vers une planète électrique.

Par exemple, dans le cadre du déploiement d'énergies renouvelables, comme l'énergie solaire, l'ensemble des aspects liés au choix de cette ressource seront consolidés : analyses en cycles de vie des panneaux, risques environnementaux, enjeux liés aux matériaux et ressources nécessaires, prévisions de la ressource, conséquences du déploiement du photovoltaïque sur la compétition dans l'usage des sols, questions d'aménagement liées à l'intégration dans les réseaux et dans un territoire, modèles d'affaires associés, besoins en investissements, usages, acceptabilité régionale, etc.

Objectifs

En 2023, l'axe 2 du TTI.5 - « planète électrique » a recensé 14 thèses labélisées (reconnues alignées avec ses objectifs) et a financé 3 sur fonds propres. Les efforts des recherches ont été orientés vers l'objectif d'abandon des énergies fossiles et d'une économie carbone neutre en 2050 fonctionnant à l'énergie électrique. Ainsi, toutes les étapes de vie de l'énergie électrique ont été abordées, en partant de la production, en passant par la distribution, jusqu'à son utilisation. Plusieurs prismes du

TTI.5 ont été actionnés - beaucoup d'efforts ont été consacrés à la modélisation et l'aide à la décision, ainsi qu'aux développements de nouvelles technologies ou matériaux nécessaires pour atteindre les objectifs de la transition. Sans être exhaustives les sections suivantes décrivent la diversité des angles par lesquels sont abordées les questions liées à l'énergie électrique au sein de l'institut.

Production d'électricité :

Toutes les thèses liées à la production d'énergie électrique mettent en lumière diverses approches novatrices pour améliorer les systèmes de production d'énergie, en traitant plusieurs ressources renouvelables, mais également les vecteurs d'énergie comme la pile à combustible ou les batteries rechargeables. Dans cette optique, Gabriel KASMI propose une méthodologie utilisant des données d'observation de la Terre et des réseaux de neurones convolutifs pour mieux estimer la production photovoltaïque en France. Quentin RAILLARD-CAZANOVE se concentre sur la modélisation de l'impact de l'électrification industrielle sur le système électrique français, en tenant compte de la flexibilité des grands consommateurs. Maëlle JOUNAY développe une méthode de détection anticipée des défauts de charge dans les pompes à chaleur, tandis qu'Alexandre PETTI se penche sur la modélisation des systèmes pile à combustible pour optimiser leur durabilité dans la mobilité hydrogène. Like ZHANG explore de nouveaux matériaux à base d'aérogels pour améliorer l'électrolyse de l'eau basse température, tandis qu'Owen PALMER propose une méthode d'aide à la décision pour développer des systèmes de production d'électricité renouvelable couplés à de la flexibilité. Enfin, Nelly PONS cherche à maîtriser l'anisotropie du comportement électromécanique du PVDF dans sa forme piézoélectrique grâce à la fabrication additive. Ces thèses illustrent la diversité des approches et des défis rencontrés dans le domaine de la production d'énergie électrique, mettant en évidence l'importance de l'innovation technologique pour relever ces défis.

Distribution de l'électricité :

La thèse de Clément CABOT (soutenue 2023) explore l'importance de la demande dans les marchés de l'électricité pendant la transition énergétique, mettant en évidence le besoin d'innovations tarifaires et d'intégration de la demande pour faciliter l'adoption des énergies renouvelables tout en réduisant l'utilisation des combustibles fossiles. Elle vise à compléter la littérature existante en analysant comment les conceptions actuelles des marchés électriques influencent la flexibilité de la demande et en évaluant les effets des signaux de prix et de la coordination entre l'offre et la demande dans un contexte d'électrification rapide. La thèse de Mohamed SAÂD EL HARRAB (soutenue en 2023), se concentre sur la modélisation des Smart Grids, tenant compte des aspects réseau, réglementaires, organisationnels et

des variables socio-environnementales, pour comprendre leurs interactions et impacts sur l'équilibre des réseaux. De même, la thèse de Victor GUILLOT examine la complexité des couplages intersectoriels dans les trajectoires de transition énergétique en France, en développant des méthodes de modélisation prospective pour éclairer ces transitions. Enfin, la thèse de Sébastien PEZZA explore la faisabilité technique et économique de différents mix décarbonés en développant une modélisation adaptée à divers types de systèmes, mettant en lumière les risques associés à certaines options technologiques.

Consommation d'électricité :

Les aspects liés à une consommation d'électricité, qui incluent également l'efficacité et la réduction de consommation, ont été abordés dans les sujets suivants. Valentin MOREAU se concentre sur l'évaluation des scénarios d'électrification des usages thermiques dans le secteur résidentiel en France jusqu'en 2050. L'objectif est de quantifier les impacts de ces évolutions sur la courbe de charge électrique et les consommations en développant des modèles techno-explicites pour décrire les logements, les équipements et les comportements des ménages. Le sujet de Katherine ALVINO SAAVEDRA porte sur la validation d'une approche de modélisation couplée thermique-électrique de bâtiments intégrant un système photovoltaïque. L'accent est mis sur l'utilisation d'une analyse de sensibilité globale pour étudier les paramètres influents et développer des outils méthodiques pour la conception de projets d'installations photovoltaïques. Enfin, la troisième thèse, menée par Antoine GOUTALAND, explore la question de la solidarité énergétique dans un contexte de transition énergétique et d'innovation intensive. Cette recherche vise à qualifier les activités d'innovation des réseaux électriques en tant que plateformes de transition et à développer un cadre théorique pour une gestion solidaire de ces plateformes, en analysant notamment l'impact des règles historiques de péréquation tarifaire.

Efficacité énergétique et réduction de la consommation :

Les thèses s'inscrivant dans cet objectif ont toutes été financées par les fonds propres du TTI.5 ; elles ont aussi toutes démarré en 2023. La thèse de Mohamed SAHAOUI se concentre sur la durabilité des machines électriques, essentielles dans la transition vers une électrification plus large pour réduire l'empreinte

carbone. En se penchant sur l'amélioration des enroulements filamenteux, elle cherche à optimiser la performance et la durabilité de ces machines, tout en abordant des aspects tels que l'Analyse du Cycle de Vie pour évaluer les impacts environnementaux. La thèse de Roblex NANA TCHAKOUTE cherche une meilleure utilisation de systèmes d'IA dans les systèmes informatiques, avec un accent particulier sur la réduction de la consommation d'énergie et des émissions de carbone. En se concentrant sur les systèmes HPC standards et les dispositifs embarqués, elle identifie les défis liés à la gestion de l'énergie et explore des stratégies pour optimiser l'efficacité énergétique tout en maintenant les performances des applications d'IA. La troisième thèse de Delphine DOUTSAS cherche à proposer une approche novatrice pour réduire la consommation d'énergie dans les modèles d'IA connus aujourd'hui pour être excessivement gourmands en data et

énergie. Elle remet en question les méthodes traditionnelles d'apprentissage basées sur des données massives et explore comment concevoir des modèles d'IA plus efficaces en utilisant des primitives perceptives et leurs relations spatiales, afin de minimiser la dépendance à l'égard de vastes bases de données.

Perspectives globales :

Le levier de l'électrique pour répondre aux exigences de la réduction de l'empreinte carbone est d'un apport considérable tant du point de vue du rendement que celui de son expansion. Le présent axe couvre cette problématique sous divers angles en fonction de nos compétences et de ce qui est possible. Les perspectives dans cette optique sont nombreuses : l'approvisionnement, le stockage, l'autonomie, la durée de vie, l'efficacité, pour ne citer que ceux-là.



6.2.2 Paroles de chercheurs

Le vecteur électrique semble s'être imposé comme une alternative de premier plan dans le contexte de la problématique des sources d'énergie à faible impact carbonique. Ceci s'illustre parfaitement par l'expansion de l'électrification des systèmes usuels auparavant principalement alimentés par des sources fortement carbonées. Toutefois, cette trajectoire s'accompagne de nombreux défis de diverses natures (techniques, économiques, stratégiques) qu'il faudrait étudier et approfondir afin de contribuer à la réussite de la transition correspondante.

Plusieurs aspects sont à prendre en compte lorsqu'on considère le choix de l'énergie électrique. Il y a la production, laquelle peut de faire via plusieurs sources possibles (hydraulique, solaire, éolien, chimique, nucléaire, ...), chacun ayant ses spécificités et réalités (disponibilité, coûts, contraintes techniques, ...); le stockage, nécessaire pour plusieurs raisons incluant l'usage différé ou embarqué, mais qui soulève des problèmes liés à la technologie de conservation, à la capacité et au rendement; l'approvisionnement, puisque la distribution de l'énergie électrique reste à améliorer du point de la couverture et de

l'efficacité; la maintenance (tant des systèmes de production que de distribution), pour ne citer que ceux-là.

Sachant que l'énergie électrique n'est pas totalement neutre en carbone, il y a aussi des efforts à faire et à maintenir par rapport aux émissions de carbone associées à la production d'électricité et à l'usage des systèmes électriques. Dans le domaine de l'informatique par exemple, l'utilisation intensive des supercalculateurs et le fonctionnement des grands centres de données induisent une consommation électrique assez importante dont l'équivalent carbone peut être préoccupant.

La question du "tout électrique" mérite aussi d'être profondément étudiée, car il y a de fortes nuances à prendre en compte comme la question des défauts (production ou approvisionnement) qui peuvent laisser les usagers démunis ou compromettre le fonctionnement des systèmes.

Le présent axe a donc pour but d'approfondir toutes les réflexions évoquées tout en contribuant à la promotion de la transition vers une considération plus forte et plus répandue de l'électrification.



6.2.3 Focus thématique

Thèse 1

Titre : Durabilité et cycle de vie de la machine électrique, au coeur des enjeux d'une transition bas-carbone

Doctorant : Mohamed SAHAOUI (mohamed.sahaoui@minesparis.psl.eu)

Encadrants de thèse : Sébastien JOANNES et Pierre ARNAUD | MAT Mines Paris - PSL ; Paula PEREZ-LOPEZ | O.I.E. Mines Paris - PSL

Qu'il s'agisse de moteurs ou d'alternateurs, les machines électriques tournantes sont à la base du déploiement du "vecteur électrique" régulièrement présenté comme incontournable pour la transition bas-carbone. Les exemples les plus emblématiques concernent la décarbonation de la mobilité, notamment légère, ou la production d'énergie avec le développement de parcs éoliens. Rien que dans l'Hexagone, le secteur des transports représente à lui seul plus de 30% des émissions de GES (Gaz à Effet de Serre), dont 51% attribués aux voitures individuelles. De la production à la consommation d'électricité, il faut notamment s'assurer que les trajectoires technologiques soient bien compatibles avec les trajectoires de consommation d'une "planète électrique". Pour cela, l'optimisation du cycle de vie des équipements et des machines tournantes est une condition nécessaire et, probablement, pas suffisante. La thèse propose une approche interdisciplinaire, mêlant la science des matériaux et l'analyse du cycle de vie, et vise à faire progresser la machine électrique en identifiant les voies les plus adaptées pour en augmenter la durée de vie tout en préservant le plus possible l'environnement.

Pour augmenter la durée de vie des machines électriques tournantes, il est nécessaire de plonger au cœur de leur fonctionnement. Les enroulements filamenteux, aujourd'hui essentiellement en cuivre, en sont la partie "active", à l'origine de la génération des champs magnétiques qui lui permettent de fonctionner. Représentant près de 30% des défaillances, les enroulements en cuivre et, en particulier, leur isolation constituent le premier facteur limitant la durée de vie de ces équipements. Par ailleurs, l'augmentation de la demande en cuivre liée aux développements des technologies d'énergie

propre pourrait à terme conduire à l'épuisement de la ressource. En effet, la quantité de cuivre nécessaire pour produire un véhicule électrique comparé à l'équivalent thermique est multipliée par quatre. Dans une logique de durabilité et de gestion de la ressource, il est donc crucial de mieux maîtriser la durée de vie des enroulements et de préciser les paramètres fondamentaux sur lesquels agir pour une optimisation du cycle de vie des machines tournantes.

La première année de ce travail de thèse aura permis de mieux cerner les leviers d'une progression en équipe au sein de deux communautés. La pertinence des résultats est décuplée par la diversité des outils offerts par l'interdisciplinarité. Concernant l'étude des matériaux, des sollicitations de "fretting" (frottements cycliques de faible amplitude) sur des fils de cuivre ont été mises en œuvre pour reproduire les sollicitations d'usage au sein des machines et fournir les données qui alimenteront un modèle de durée de vie, aujourd'hui en construction. Ce modèle sera ensuite utilisé dans la phase d'inventaire de l'analyse de cycle de vie. En complément, pour une meilleure compréhension des mécanismes à l'œuvre au sein des fils, des caractérisations microstructurales ont été menées, avec des analyses aux microscopes optiques et électroniques, ainsi qu'une analyse cristallographique de l'orientation des grains composant les fils de cuivre. L'un des axes du travail identifiés réside dans la prise en considération des incertitudes dans l'analyse du cycle de vie, qui devra par ailleurs nous permettre de projeter les voies d'améliorations du vecteur électrique. L'enjeu de la thèse n'est pas de se focaliser sur une technologie en particulier, mais d'établir les protocoles d'essai et le cadre de modélisation nécessaires pour

lier de manière pertinente les travaux entre durabilité et soutenabilité. Il s'agira de construire un modèle paramétré, intégrant le calcul de la durée de vie issu des essais mécaniques. Celui-ci permettra de produire les résultats d'impacts environnementaux selon différentes catégories,

comme le potentiel de réchauffement climatique, la toxicité, l'acidification, etc. Ce modèle permettra également d'évaluer les impacts associés à l'utilisation de matériaux alternatifs au cuivre pour les électroaimants des machines électriques.

Thèse 2

Titre : Intelligence artificielle haute performance à faible émission de carbone

Doctorant : Roblex NANA TCHAKOUTE (roblex.nana_tchakoute@minesparis.psl.eu)

Encadrants de thèse : Claude TADONKI Mines Paris – PSL/CRI ; Petr DOKLADAL, Mines Paris – PSL/CMM et Youssef Mesri Mines Paris – PSL/CEMEF

Contexte : La problématique de l'énergie des systèmes informatiques est exacerbée d'une part par l'émergence et la prolifération des appareils dits intelligents, et d'autre part par l'utilisation intensive et continue des gros moyens de calcul notamment dans le domaine de l'intelligence artificielle. On a donc deux contextes qui se distinguent particulièrement : le calcul embarqué où la consommation énergétique est contrainte, car la disponibilité est limitée, et le calcul haute performance où les coûts d'approvisionnement énergétique ainsi que la dissipation de chaleur et le bilan carbone sont des préoccupations majeures. Face à cette réalité, une compréhension approfondie des mécanismes liés à l'énergie des systèmes informatiques est cruciale pour une meilleure des développements futurs.

Objectifs : L'objectif principal de cette thèse de doctorat est de dresser un panorama détaillé des enjeux énergétiques dans le domaine de l'informatique, tant du point de vue matériel que logiciel. Il s'agit notamment de comprendre comment l'efficacité énergétique peut être améliorée à tous les niveaux de conception et d'utilisation des systèmes informatiques,

en mettant en lumière les défis spécifiques rencontrés dans les contextes du calcul embarqué et du calcul haute performance. Les applications basées sur l'intelligence artificielle constitueront un focus particulier. L'issue de cette investigation devrait être l'identification des meilleures pratiques et le développement des approches novatrices permettant de réduire la consommation d'énergie tout en maintenant des performances satisfaisantes.

Méthodologie : Pour atteindre les objectifs fixés, une approche multidisciplinaire est privilégiée, combinant des méthodes qualitatives et quantitatives. Une analyse approfondie de la littérature scientifique sera effectuée afin de résumer l'état de l'art sur la problématique de l'énergie des systèmes informatiques. Des études de cas seront menées dans le but d'évaluer la performance énergétique de divers scénarios et ainsi illustrer l'ampleur du problème pour lequel des techniques statiques et dynamiques seront proposées. Enfin, des outils logiciels accompagnés des modèles prédictifs seront développés pour l'évaluation de l'efficacité des différentes stratégies proposées.



6.2.4 Faits marquants

Deux thèses inscrites dans l'axe 2 ont démarré en 2023, financées par TT1.5

- Roblex NANA TCHAKOUTE : Intelligence artificielle haute performance à faible émission de carbone ;
- Delphine Doutsas : Développement de modèles frugaux s'inspirant de la perception des mammifères pour une IA à faible émission de carbone ;

Trois thèses labellisées dans l'axe 2 ont été soutenues en 2023, dont en particulier celle de Clément CABOT (8 novembre 2023), doctorant au CERNA Mines Paris - PSL, avec le titre « *Economic considerations on the demand-side of electricity markets in a context of energy transition* ». C'était une thèse en partenariat avec l'entreprise Deloitte et ses encadrants étaient François LÉVÊQUE (CERNA Mines Paris - PSL) et Manuel VILLAVICENCIO (Deloitte Economic Advisory). En septembre 2023, Clément CABOT a rédigé le premier Working Paper TTI.5, avec pour thème : « *The demand-side flexibility in liberalised power market: a review of current market design and objectives* ». Il est le premier

doctorant labellisé TTI.5 à valider entièrement le parcours proposé par l'institut. Clément Cabot résume sa thèse ainsi : « Ma thèse traite des défis soulevés par la transition bas-carbone du secteur électrique - notamment la gestion de la variabilité des énergies renouvelables. Les efforts d'électrification et de réindustrialisation sont l'opportunité d'une participation plus active de la demande - grâce aux nouvelles technologies comme les compteurs intelligents ou les véhicules électriques. Ma thèse cherche donc à étudier le rôle que peuvent les flexibilités du côté de la demande, et les différentes façons de les mobiliser. »



6.2.5 Conclusion et propositions pour l'avenir

La description des travaux et des objectifs de l'axe 2 montre une grande richesse de sujets financés et labélisés par TTI.5 qui couvrent aussi bien les enjeux de génération d'électricité, que ceux de transport et de distribution, ainsi que d'utilisation de l'électricité pour divers usages finaux. Les propositions pour l'avenir seront de consolider cette vision à la fois transversale à l'échelle de l'axe et capable d'être très spécifique et pointue dans chacun des sujets abordés. Pour l'année à venir, l'ambition est de conforter cette couverture large par la poursuite des travaux de recherche déjà engagés et par l'identification de projets permettant d'explorer de nouvelles thématiques. Citons pour illustrer ces nouvelles initiatives liées à l'axe 2 (et qui seront progressivement répertoriées) : le projet phare Carnot Mines sur la mobilité électrique, la modélisation prospective et les enjeux d'électrification dans un territoire d'outre-mer, l'actualité des travaux de recherche sur l'hydrogène.

Projet phare Carnot Mines

La mobilité de demain est une question centrale dans la société actuelle. Les choix faits aujourd'hui vont avoir un poids conséquent sur les impacts environnementaux, sur l'économie nationale, sur le secteur de l'emploi et sur la société en général. Alors que l'Europe impose la fin des moteurs thermiques pour 2035, plusieurs questions restent ouvertes aujourd'hui sur l'opportunité de ce choix. Le projet vise à faire le point sur la question de la mobilité électrique avec une approche holistique, à travers un regard transdisciplinaire, en interpellant les

différentes disciplines présentes au sein de l'école Mines Paris. L'objectif ambitieux du projet est d'arriver à synthétiser les nombreux points de vue des chercheurs de l'école (et au-delà) sur la question de la mobilité électrique.

Le projet débutera par un recensement, au sein de l'école dans un premier temps, puis à l'extérieur, des recherches pouvant alimenter la réflexion autour de la mobilité électrique. Toutes les disciplines présentes au sein de l'école seront interpellées, pour construire une tour d'horizon le plus complet possible et pour identifier les verrous potentiels qu'il faudra considérer dans les phases successives du projet. Un certain nombre de macro-sujets peuvent déjà être établis, sans pour autant se donner de limites pour les recherches à venir. En particulier, ils ont été identifiés : matériaux et technologies de production, hydrogène, ressources minérales et autres, configurations géopolitiques, impacts environnementaux et sociétaux. Les enseignant-chercheurs travaillant sur ces macro-sujets contribueront, en interaction avec l'ingénieur qui sera embauché pour ce projet, à nourrir la réflexion autour de la mobilité électrique et des alternatives possibles. Un bilan complet pourra être établi à la fin de ce travail exploratoire.

Le but du projet sera la rédaction de deux documents : une note d'éclairage à destination des décideurs politiques et du monde socio-économique et un ouvrage de vulgarisation scientifique à destination beaucoup plus large. L'idée est que le travail puisse nourrir un débat éclairé sur le sujet de la mobilité électrique, en

prenant en considération les différents points de vue provenant d'un large panel de disciplines scientifiques.

Thèse Nouvelle-Calédonie

Doctorant Arnaud Rouget / Encadrant: Edi Assoumou CMA Mines Paris PSL

Une nouvelle thèse lancée en coopération avec le gouvernement de Nouvelle-Calédonie a pour objectif d'éclairer les trajectoires de transition bas carbone pour ce territoire insulaire et d'en évaluer en particulier les implications pour le système électrique. La Nouvelle-Calédonie est un territoire français d'outre-mer composé d'une île principale et de plusieurs îles archipélagiques et isolées et dont l'économie repose en grande partie sur une activité minière importante développée autour de l'extraction de gisements latéritiques de nickel. En 2020, la Nouvelle-Calédonie a produit jusqu'à 8 % de la production mondiale de nickel. Cependant cette exploitation minière et les activités pyrométallurgiques qui s'ensuivent nécessitent une grande quantité

d'électricité, principalement fournie par des centrales thermiques à fortes émissions de CO2 (essentiellement au charbon). Ces éléments montrent dès lors l'intérêt de la Nouvelle-Calédonie comme territoire d'étude pour une transition bas carbone :

- Le nickel fait partie des matériaux identifiés comme critiques pour la transition énergétique ;
- La prospective de cette activité minière qui représente aujourd'hui près de 2/3 de la consommation électrique du territoire aura un effet très structurant pour l'évolution du système électrique ;
- De par son insularité, la Nouvelle-Calédonie fait aussi partie des territoires les plus vulnérables au changement climatique.

Les travaux de recherche menés dans le cadre de cette thèse mobilisent les compétences du CMA et de la direction en charge de la politique énergétique en Nouvelle-Calédonie. Ils ont pour ambition le développement d'un modèle de planification à moyen et long-terme représentatif du contexte de l'archipel et de ses enjeux énergétiques.

6.3 Axe 3 : La planète inclusive



6.3.1 Description et objectifs de l'axe

La transition répondant à un problème global, il est nécessaire d'y intégrer toutes les échelles et tous les acteurs de la société, tout en assurant une cohérence entre eux, afin d'éviter, une fois encore, que les solutions des uns ne deviennent les problèmes des autres. Cet axe traite ainsi des enjeux de gouvernance de cette transition vers une décarbonation de nos sociétés et de l'inclusivité de cette gouvernance, qui reste aussi cadrée par certaines contraintes physiques. Les conditions de cette inclusion sont élaborées en tenant compte du caractère multi-échelles du défi climatique et des contraintes dans lesquelles nous nous trouvons pour résoudre cette décarbonation : notamment les limites physiques liées à la finitude de la planète et toutes les conséquences associées au niveau économique, social, géopolitique, etc.

Les acteurs

Il s'agit d'identifier les solutions permettant d'engager les différents acteurs dans la transition. On pourra dans un premier temps consacrer nos travaux aux entreprises et aux

ménages. Afin de questionner les différentes options permettant d'engager les entreprises et les industries dans la transition, on envisagera les outils pour éclairer les démarches et les

choix stratégiques des entreprises, les mesures incitatives et coercitives à déployer, tout en intégrant les enjeux de viabilité, de durabilité et d'adaptation. Par exemple, les aménagements envisagés à l'échelle d'un territoire seront évalués suivant leur intégration dans le métabolisme de ce même territoire (intégration dans les flux et stocks de matières du territoire, intégration au tissu urbain, économique et social). Parmi les outils supports de cet éclairage, on peut mentionner la conception et le déploiement des outils de comptabilité écologique, la construction d'indicateurs spécifiques à la décarbonation, la mise en place des analyses en cycle de vie, la prise en compte des risques environnementaux, les modèles d'affaires, les approches prospectives.

Il s'agit également de concevoir des outils favorisant l'engagement des ménages dans la transition et la transformation des modes de vie, qui permettent d'activer des leviers de sobriété et constituent des incitations à l'utilisation des solutions bas-carbone dans les trois secteurs que sont la mobilité, le résidentiel et la consommation de biens et services. Les questions seront abordées en prenant en compte les enjeux d'acceptabilité et d'accessibilité des solutions, des services, des infrastructures, des ressources et tout ce qui concourt (en termes de formes de gouvernance) à une appropriation sociale la plus large possible de ces choix sociotechniques liés à la décarbonation.

Outils de mise en cohérence

On propose de déployer des outils et démarches qui permettent la mise en cohérence d'un ensemble d'acteurs dans la transition, parmi lesquels figurent les modèles de circularité. Face aux enjeux de finitude des ressources, de croissance continue de la production de déchets et de réduction des émissions de gaz à effet de serre, les modèles de circularité visent, par le recyclage, la réutilisation des produits et la réduction à la source des déchets et de la production, à transformer simultanément les systèmes d'offre et les comportements des consommateurs. Il s'agit notamment de

réduire l'empreinte matérielle de l'économie par l'amélioration de l'efficacité matière, l'allongement de la durée de vie des produits et des technologies (réparabilité, réemploi) et l'intensification de leurs usages (économie de fonctionnalité). Leur mise en œuvre demande une coordination de très nombreux acteurs (collectivités territoriales, entreprises, ménages, associations) et interroge différentes échelles d'action et de décisions. Ils sont pertinents pour réfléchir sur les principes et les conditions de mise en œuvre des principes de l'économie circulaire et des symbioses industrielles.



6.3.2 Paroles de chercheurs

Une des difficultés dans cet axe est de réaliser le changement d'échelle ; il est impossible de penser l'inclusivité à l'échelle de la planète si on n'a pas d'inclusivité à l'échelle de la ville, et d'un pays. Or les problématiques sont assez différentes en fonction des échelles : à l'échelle de la ville, l'urbanisme devient central, en revanche dans les réflexions sur l'inclusivité de la planète, les problématiques sont d'ordre géopolitique.

Dans cette réflexion, il faut certainement adopter un prisme sociologique, mais pour les enjeux multi-échelle, la cartographie et la caractérisation des flux sont indispensables. D'ailleurs, sont inscrits dans cet axe des travaux scientifiques qui ont vocation à évaluer les substitutions vertueuses (de technologies, de matériaux, etc.). Dans ce cadre l'inclusivité est prise en compte pour des décisions plutôt d'ordre technique, comme par exemple dans les thèses sur la substitution de polymères.

Il est impératif d'intégrer les échelles spatiales et sociales pour déployer des solutions efficaces. Par exemple, quand on substitue des matériaux quelque part, l'objet de substitution peut créer des externalités ailleurs qui ne sont pas alignées avec les enjeux du changement climatique.

Objectifs :

La mise en perspective des questions d'inclusivité à travers les travaux éparses de Mines est un enjeu majeur pour cet axe. Alors que les sciences humaines et sociales présentent le prisme le plus partagé pour traiter de cet enjeu, de nombreux travaux ne mettant pas en avant les enjeux sociaux alimentent cette réflexion avec des approches sectorielles, géographiques, par type de ressource... Notre enjeu est de réaliser une synthèse de ces déclinaisons pour que l'inclusion que nous questionnons puisse s'éclairer dans une vision holistique. À la lumière des sujets de thèses qui sont dans cet axe, on peut en effet mesurer l'intérêt de réaliser la synthèse des contributions à venir parcourant les enjeux matériaux/ énergies/ politiques publiques/ technologies/ sociaux/ :

- "Energy saving by employing thermal superinsulating bio-aerogels"
- « De la conception à la mise en place : la politique de rénovation des bâtiments à l'épreuve des usage(r)s [acronyme : PREBAT] »

- « TASER : Traitements par pLASma froid de fibrEs biosouRcées : Vers une chaîne complète d'éco-conception et usage de bio-composites pour l'Industrie 4.0 »
- « Modèles et outils pour le développement de micro-réseaux de chaleur en milieu rural »
- "BIODRAG : Biopolymer-induced drag reduction: a promising technique to minimize water and electricity wastes in water pumping systems"

On note une forte porosité entre l'axe 3 et 4 : en particulier on envisage les aspects techniques des enjeux liés aux ressources planétaires (eau, matériau, minéraux, ...) dans l'axe 3 alors que les aspects géopolitiques sont traités dans l'axe 4 (car cela peut générer des conflits locaux et régionaux).

Cette coordination autour des matières premières sera effective prochainement via le recrutement d'un ingénieur de recherche (voir focus axe 4).

6.3.3 Focus thématique

Nous souhaitons ici faire un focus sur la sortie, en 2023, de l'ouvrage de chercheurs et d'une doctorante du Centre de Gestion Scientifique (CGS) de Mines Paris : « Le changement climatique comme péril commun. Réconcilier action climatique et justice sociale. » de C. Demonsant, A. Hatchuel, K. Levillain et B. Segrestin.

Cet ouvrage brillant nous invite à nous interroger sur les principes de justice appropriés à la multiplication des efforts demandés pour une transition dans un monde bas carbone. Grâce à la « règle des avaries communes » qui prend sa source dans le droit maritime antique, les auteurs nous présentent une alternative prometteuse au principe du « pollueur-payeur ». Dans un contexte où les enjeux sociaux et environnementaux sont souvent présentés comme antagonistes (voir la crise des gilets jaunes, ou plus récemment la « gronde des agriculteurs »), cet ouvrage offre de nouvelles perspectives grâce à la proposition d'un cadre de réflexion pour découpler la gestion de l'efficacité et celle de l'équité.

« La lutte contre le changement climatique est menacée de paralysie. Niles États, niles institutions internationales ne sont parvenus à établir des principes de justice clairement partagés, au nom desquels répartir équitablement les efforts nécessaires.

Face à ce constat alarmant, cet ouvrage propose de nouvelles voies pour concilier action climatique et justice sociale. Il montre que les politiques climatiques buttent sur un dilemme entre équité et efficacité parce que les instruments envisagés, tels que les incitations économiques, visent avant tout l'efficacité et renvoient la question de l'équité à des arrangements politiques et sociétaux ad hoc. Cet ouvrage inverse l'approche : l'action climatique peut devenir à la fois plus efficace et plus juste dès lors qu'elle est reconnue comme une action de sauvetage face à un péril commun.

Cette notion de péril commun ouvre la voie à de nouvelles solutions d'une grande robustesse. Ainsi, l'ancienne règle des « avaries communes » issue du droit maritime permet de partager équitablement les sacrifices consentis pour

échapper à un péril commun. Face au changement climatique, une telle règle de justice, posée en préalable, garantirait à la fois les mesures les plus efficaces et l'assentiment de tous aux efforts demandés.

Ce livre invite chercheurs et responsables à prendre la mesure des implications libératrices de cette approche pour l'action climatique. »²



6.3.4 Fait marquant

Le 30 novembre 2023, l'etilab a présenté son rapport sur la décarbonation des Entreprises de Taille Intermédiaire (ETI) industrielles. Ce rapport de l'etilab rappelle la baisse importante des émissions de gaz à effet de serre en France, estimées à 404 Mt CO₂eq en 2022, soit près de 25 % de moins qu'en 1990. Cette réduction est largement due au secteur de l'industrie manufacturière qui subit depuis les années 1970 un phénomène de désindustrialisation.

Les ETI sont au cœur du tissu industriel français. Elles y sont les premiers employeurs avec 35 % des effectifs, elles sont le poumon industriel des territoires et sont présentes tout au long des chaînes de valeur. Les ETI ont un grand rôle à jouer dans la réindustrialisation et leur décarbonation est une étape essentielle de la réduction des émissions de l'industrie.

Les émissions de l'industrie manufacturière sont de deux types : les émissions de procédés (50,3 %) engendrées par les réactions chimiques réalisées lors de la fabrication et les émissions de combustion (49,7 %) issues, pour une large part, de la production de chaleur. En analysant les données des quotas carbone, le rapport montre que les émissions totales (procédé et combustion) des Grandes Entreprises (GE) et des ETI sont comparables dans l'industrie. Une analyse fine des consommations énergétiques permet d'arriver à la même conclusion pour les seules émissions de combustion. Ces deux

analyses conduisent à la conclusion principale du rapport : décarboner les ETI est aussi important que de décarboner les GE.

Concernant les voies de décarbonation potentielles, le rapport insiste sur l'importance de la transition énergétique en soulignant les gains qu'entraînerait une substitution du gaz (aujourd'hui largement utilisé par l'industrie) par des alternatives plus respectueuses de l'environnement comme l'électricité, dont la production en France est relativement peu émissive. L'analyse identifie en outre 12 secteurs particulièrement sensibles pour les ETI qui concentrent l'essentiel de leurs émissions ainsi qu'une part importante de leurs emplois, et qui devraient faire l'objet d'un intérêt particulier par les politiques de décarbonation.

Le rapport de l'etilab offre ainsi une vision détaillée de l'importance des ETI dans la décarbonation industrielle, identifiant des voies concrètes de décarbonation et a suscité l'intérêt des scientifiques (CIRED, PSE) ainsi que des institutions publiques et parapubliques (DGE, ADEME, SGPI, CSF-NSE, bpifrance, Insee, Région Île-de-France, CEPIL, ...).

Le rapport est disponible à ce lien : <https://etilab.minesparis.psl.eu/wp-content/uploads/2023/12/etilab-decarboner-les-ETI-04dec23.pdf>



6.3.5 Conclusion et propositions pour l'avenir

La thèse de Théodore Fontenaille, financé par TTI.5, intitulé « Modèles et outils pour le développement de micro-réseaux de chaleur en milieu rural » a débuté en 2023. Ce projet a reçu un financement de l'Institut, car nous avons particulièrement apprécié l'intégration

des problématiques du développement territorial et son caractère interdisciplinaire qui lui permet d'aborder plusieurs prismes et de s'inscrire totalement dans la philosophie scientifique de TTI.5. Nous sommes très attachés à suivre les progressions de ces travaux

2. Résumé de l'ouvrage C. Demonsant, A. Hatchuel, K. Levillain, B. Segrestin (2023). Le changement climatique comme péril commun. Réconcilier action climatique et justice sociale.

et plus particulièrement pour ce qui concerne le développement d'outils d'aide à la décision à destination des collectivités territoriales.

« La thèse s'inscrit dans un contexte de décarbonation des besoins thermiques des bâtiments en milieu rural. L'enjeu est important, car c'est dans les territoires ruraux que les chauffages au fioul est le plus présent et que le revenu moyen des foyers est le plus faible. À titre d'illustration, la part des résidences principales chauffées principalement au fioul à Paris était de 3,8% en 2019 et atteignait 33,7% en Lozère la même année (INSEE, 2023).

Les territoires ruraux sont souvent oubliés par les acteurs de la recherche sur la transition énergétique. Pourtant, ils sont des zones clés pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre en raison de la forte pénétration des

énergies carbonées notamment du chauffage au fioul et de l'habitat énergivore.

Dans ce contexte, les micro-réseaux de chaleur sont une solution pour décarboner les besoins thermiques du bâtiment par des sources d'énergie renouvelables et locales (biomasse, biogaz, géothermie de surface...). Il y a des initiatives locales réussies, elles ont besoin aujourd'hui d'être répliquées massivement.

La thèse vise à analyser les besoins pour la réussite de ces projets et proposer des modèles et outils pour accompagner les acteurs locaux dans le montage de projets de micro-réseaux. Il s'agira d'analyser les bonnes pratiques et étudier leur répliquabilité, proposer des outils de modélisation simplifiés et fiables pour effectuer des choix techniques, étudier la faisabilité et dimensionner les installations. »³

6.4 Axe 4 : La planète comme enjeu d'influence



6.4.1 Description et objectifs de l'axe

Dans cet axe, on interroge ainsi les organisations, les instruments politiques, les mécanismes financiers, ainsi que les règles, procédures et normes qui régulent les processus mondiaux de protection du climat et de l'environnement. Nous proposons notamment d'interroger les modalités de construction des objectifs globaux et de leur mise en œuvre. Cet éclairage est en effet indissociable de la compréhension des conditions techniques, économiques, sociales et politiques qui sont associées aux différents objectifs adoptés, et plus particulièrement à ceux liés à la stabilisation des températures. La discussion de la déclinaison des objectifs globaux à différentes échelles est également fondamentale : cela requiert de questionner la répartition des efforts de réduction, de reposer les questions de responsabilité différenciée

et de contribution juste à la décarbonation. Derrière ces questionnements se jouent des enjeux d'éthique liés à la gestion des ressources et aux pratiques d'ingénierie et, à un niveau plus politique, des enjeux de justice environnementale, de propriété et de partage de la valeur qu'il s'agit d'articuler ici aux contraintes liées à la physique du climat. En particulier, une transition bas-carbone véritable exige de prendre en compte non seulement le point de vue des pays développés, mais également celui des pays émergents dont les visions et les modèles peuvent différer substantiellement des premiers. Les enjeux autour de l'utilisation des indicateurs comme système d'information dans la gouvernance (enjeux de rayonnement et de responsabilité ; enjeux autour des conventions utilisées ;

3. Extrait du dossier de soumission du projet.

enjeux quant à la gestion de la donnée et de l'intervention du secteur privé) sont également centraux.

De plus, Si la transition s'inscrit dans une vision et dans un contexte global, elle se décline à des échelles locales et se confronte donc à des réalités diverses et des enjeux de compétitions. Cela nécessite un éclairage des enjeux de souveraineté et d'autonomie autour de l'approvisionnement en ressources. La transition peut également nourrir la compétition économique (développement, positionnement technologique, brevets, etc.) entre différents acteurs économiques : enjeux technologiques, via les brevets, l'avance

technologique, le déploiement de filières, les normes, etc. Ainsi, les stratégies d'influence autour du défi climatique peuvent être source de cristallisation des rivalités. La position affichée par plusieurs régions de volonté de prise de pouvoir sur la question climatique, de l'Europe des 27 à la Chine ou aux Etats-Unis, anime une recomposition des rapports de force internationaux, qui induit une réactualisation des coopérations, mais aussi des formes de rivalités, autour du contrôle des ressources notamment. Ces positionnements relatifs sont également des éléments qu'il est indispensable d'intégrer dans la réflexion pour l'élaboration d'une véritable transition bas-carbone.

Objectifs :

Enfin, en vue d'aborder les différentes stratégies de transition et d'analyser la planète en tant qu'enjeu d'influence, nous avons décidé dans un premier temps de concevoir une représentation de la production et des flux des diverses matières premières nécessaires au monde d'aujourd'hui et de demain, tel que les minerais pour les matériaux, l'énergie, les hydrocarbures, les matières premières agro-alimentaires, l'eau... Cette représentation constituera un outil permettant de suivre le parcours d'une matière première depuis sa création ou son exploitation jusqu'à son utilisation, en passant par toutes les étapes de transformation. Ainsi, grâce à cet outil, les conflits (qu'ils soient armés ou non), l'évolution de la répartition des bases militaires, les crises sociales (qu'elles soient violentes ou non) et bien d'autres manifestations de déséquilibres locaux (engendrés par des manques de ressources ou des modifications locales importantes par exemple) pourront être analysés de manière systématique et méthodique. De plus, des manifestations à l'échelle des populations soucieuses de leur

environnement et de leur futur pourront être analysées, et lancer des effets de modes.

À partir de ce travail, une réflexion géostratégique sera nécessaire. Elle s'appuie en grande partie sur une démarche prospective à travers une volonté d'anticiper et éclairer des futurs possibles et d'amener des éléments concrets aux décideurs. Cette approche repose sur la présentation de scénarii construits à partir de l'imbrication de variables définies et analysées sur le long terme. Afin de mener à bien cette réflexion, l'identification des principales variables fera l'objet d'une étude fine et précise pour envisager des évolutions aux horizons 2050 voire 2100. Elle aboutira à une série d'hypothèses pour chacune des variables dont leurs combinaisons permettront de proposer des scénarii illustrant des futurs possibles. Cette approche d'anticipation rationnelle s'appuyant sur des options stratégiques permettra d'accompagner et d'orienter au mieux les futures décisions liées à la transition.

6.4.2 Paroles de chercheurs

Certains parmi nous ont saisi l'opportunité de participer à cet axe comme un moyen de combiner expertise scientifique et domaines d'intérêt personnels, d'autres comme un moyen d'élargir la vision de leur champ de recherche déjà orienté vers ces enjeux. L'axe 4 répond bien à cela en se présentant comme un axe dans lequel nos domaines d'expertise scientifique

tels que les ressources, les matériaux et l'énergie s'intègrent dans une perspective sur les enjeux géostratégiques à l'échelle mondiale. Cette dernière thématique est aujourd'hui indispensable à la compréhension globale de systèmes complexes interconnectés en évolution et dont la sensibilité peut mettre à mal les processus de transitions.

Nous sommes tous convaincus qu'une telle synergie conduira à une contribution originale, novatrice et moins conventionnelle à la recherche. Il s'agit de porter plus loin les ambitions de transition de nos sociétés, mais

aussi la manière dont la recherche s'empare de ces questions, et d'autre part, de participer à un grand projet de collaborations renforcées et d'échanges scientifiques au sein de Mines Paris et au-delà.



6.4.3 Focus thématique

Nous avons mené différentes réflexions sur ce qui pouvait être rassemblé autour de ces questionnements et nous sommes focalisés sur les tensions liées à la gestion des ressources qui peuvent en effet être source de cristallisation des rivalités. L'approvisionnement en ressources dans ce contexte de transition conduit à une recomposition des rapports de force internationaux et donc à une réactualisation des coopérations et des rivalités autour du contrôle des ressources. Par exemple, avec la forte demande attendue dans les années à venir pour les batteries électriques, principalement pour répondre aux besoins de mobilité, le lithium, le cuivre et le cobalt deviennent des matériaux stratégiques pour la transition. Il est alors indispensable d'avoir une représentation de la production des différentes matières premières nécessaire pour le monde d'aujourd'hui et de demain et, dans le même temps, de considérer l'exploitation et la circulation des différentes ressources pouvant se trouver fortement impactées par les conditions géopolitiques et les temps de tensions et conflits.

Ainsi, un projet, dont l'enjeu méthodologique est fort, démarrera dans les mois à venir pour construire une base de données des sites d'extraction de ces matériaux à l'échelle de la planète qui sera, dans un second temps, couplée à une cartographie des tensions armées. Ainsi, au-delà des matériaux étudiés, ce travail constituera les bases d'une méthodologie appelée à se généraliser dans les années à venir. Les interconnexions entre matériaux stratégiques, production d'énergie seront également fortement influencés dans le futur par la disponibilité de la ressource en eau grandement sensible aux changements globaux, sociétaux et climatiques. Ces éléments constitueront les premières briques à la construction de scénarii à vision long-terme. Ils permettront dès lors d'apporter à chaque acteur, décideur un panel de réflexions géostratégiques sur les enjeux liés à la transition.

De même, face aux changements globaux, il

est aujourd'hui crucial d'identifier des voies d'atténuation et d'adaptation. Les enjeux actuels sont nombreux, notamment l'accès dans le futur à l'eau, à l'alimentation, à l'énergie pour permettre aux sociétés qui investissent les territoires de fonctionner, et ce à moindre coût d'émissions de gaz à effet de serre. A l'ère de l'Anthropocène, les moteurs du changement résultent de changements de pratiques sociales. L'échelle spatiale de mise en œuvre de ces changements est aujourd'hui clairement identifiée comme étant celle des territoires qui dialoguent entre eux via des solidarités de bassins de vie, bassins hydrographiques, ainsi que des échanges de biens et de services les connectant en permanence au reste du monde. Ces interconnexions commencent seulement à être intégrées dans les réflexions sur le devenir des activités humaines mises en relation avec leurs empreintes hydriques, dont l'externalisation territoriale s'exprime via le concept d'eau virtuelle. Si le développement de projets interdisciplinaires visant à penser le statut de l'eau virtuelle dans les activités industrielles dans des territoires en tension hydrique sont en cours de réflexion, les chercheurs de l'École ont d'ores et déjà développé des outils de modélisation numérique de la ressource en eau à l'échelle des entités de gestion de cette ressource que représentent les grands bassins versants régionaux comme le bassin de la Seine. Ce travail a été réalisé au sein du [PIREN-Seine](#), où l'atténuation est la clé de la stabilisation du régime hydrologique du bassin dans le futur.

Au sein du programme [PIREN Seine](#), une approche interdisciplinaire est mise en œuvre, se basant sur une méthodologie couplée de scénarisation des pratiques et d'évaluation de leurs impacts par modélisation numérique. À cet effet, Mines Paris, PSL Université, développe des logiciels [ProSe-PA](#) et [CaWaQS](#), qui permettent de simuler le grand cycle de l'eau, incluant les ressources en eaux souterraines, et la qualité de l'eau associée. En 2023, une méthodologie innovante permettant de dépasser les problèmes historiques d'ajustement des modèles hydrologiques a

été développée par les chercheurs de l'École. Elle permet grâce à une analyse non pas dans le domaine temporel, mais dans le domaine fréquentiel de mettre en lumière le caractère « passe-bas » des bassins versants. Autrement dit, les bassins versants transfèrent directement les variations hydroclimatiques de temps long dans les signaux hydrologiques que sont les débits des rivières et les variations de stock des eaux souterraines. De plus cette analyse permet d'accéder à des paramètres clés des hydrosystèmes régionaux tels que la fraction de pluie contribuant à la recharge des ressources en eau souterraine. La connaissance nouvelle de cette information clé non observée, ni observable à cette échelle, permet de fiabiliser les modèles hydrologiques régionaux et par là

même de renforcer la fiabilité des évaluations des possibles impacts des projections hydroclimatiques du GIEC sur la ressource en eau du bassin de la Seine, ou encore l'impact de changements de pratiques agricoles ou de gestion des eaux usées urbaines sur la qualité des eaux.

Des développements ont actuellement lieu dans ces outils pour simuler les flux de chaleur dans les hydrosystèmes. Cela ouvrira des perspectives de couplage avec des questionnements relatifs à la transition énergétique d'un point de vue systémique, notamment le développement de la géothermie et du stockage d'énergie en cavités salines.

6.4.4 Fait marquants

Événements :

Production d'une Exposition itinérante «LES MINÉRAUX, AU CŒUR DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE» par les étudiants de l'ISIGE

Date : Février 2023 - Décembre 2023, (expositions en cours en 2024...)

«LES MINÉRAUX, AU CŒUR DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE » est une exposition itinérante réalisée par les étudiants du Mastère Spécialisé Expert en Environnement et Développement Durable IGE de l'ISIGE Mines Paris, ISIGE

Cette exposition permet aux visiteurs de découvrir 6 des minéraux clés de la transition bas carbone : cuivre, nickel, lithium, platine, cobalt, terres rares. Elle aborde de manière scientifique et pédagogique les questions liées à la croissance de la demande de ces minéraux dans un contexte de transition énergétique, les enjeux industriels, les tensions sur les réserves à l'échelle mondiale, à moyen et long terme, avec leurs risques géopolitiques, ainsi que les impacts environnementaux et sociaux de ces industries.

Lieux d'exposition : d'abord présentée en février 2023 au musée de Minéralogie de l'École des Mines, l'exposition a ensuite rejoint la Mairie de Montmagny en Avril pour la Journée de la science, puis le Musée Wolframines dans l'Allier. Elle a ensuite été présentée à l'École des Mines d'Alès en mai, avant de revenir en juin à l'École des Mines, dans le cadre du Festival Histoire de



l'art de Fontainebleau. Enfin, elle a été exposée dans différentes entreprises, au Pôle DD de Décathlon, chez ECOSYSTEM, et enfin chez RTE. Plus récemment, elle a été présentée au Lycée Uruguay de Fontainebleau.

Cette exposition a été conçue dans le cadre d'un projet confié aux étudiants du MS EEDD parcours IGE. Après avoir produit un travail d'analyse par groupes pour chacun des 6

minéraux, et avoir présenté ce travail devant un jury composé d'enseignants-chercheurs de l'École, Cécile Schwartz et Thomas Beaussier, responsables du MS, et Damien Goetz, professeur à Mines Paris responsable de l'option Sol et Sous-Sol, les étudiants ont ensuite, avec l'appui de Sabrina Ramessur, responsable Communication de l'ISIGE, et de leurs enseignants, conçu les maquettes des kakemonos, chacun dédié à l'un des 6 minéraux :

- Cobalt, une ressource minérale indispensable de la transition écologique
- Cuivre, fil conducteur de la transition énergétique
- Platinoïdes, les métaux précieux de la transition bas carbone
- Nickel, la transition énergétique sera-t-elle nickel ?
- Terres Rares, les vitamines de la transition énergétique
- Lithium, la ruée vers l'or blanc



Workshop IMT et MINES Paris PSL, 2023 « Considérer les multi-matériaux de la chimie et physico-chimie à leur fonctionnalité » - « H2O : clef des matériaux fonctionnels »

L'IMT et MINES Paris PSL ont organisé un Workshop 'Défis matériaux', les 05 au 06 Décembre 2023, à Mines Paris PSL Campus Pierre LAFFITTE. L'objectif de ce workshop a voulu considérer l'apport de la chimie sur l'émergence de nouveaux matériaux (composites, métalliques, et céramiques) et apports de fonctionnalités. La colonne vertébrale fédératrice du Workshop était construite autour de l'eau. Chaque session a été ponctuée de présentations sur respectivement

le « vieillissement de biocomposites en milieu marin », les « systèmes de protection corrosion en milieu marin », l' « eau potable et membranes », les « plastiques en mer », l' « arsenic & substrats adsorbants pour la protection d'eau potable ». Une Table Ronde a été animée sous l'intitulé « H2O : clef des matériaux fonctionnels » avec pour intervenants S. Pelegri (Métropole Nice), C. Gandouin (AQ(T)UA Vence), et Y. Mamindy-Pajany (Eau Azur Nice).

Soutenance de thèse:

Le 22 septembre 2023, Lucas Desport a soutenu sa thèse intitulée « Intégration de la capture, utilisation et stockage du carbone dans les modèles socio-technico-économiques : optimisation long terme du système énergétique mondial et décarbonation de l'industrie ». Financé par TotalEnergies, et sous la direction de la Dr. Sandrine Selosse, les recherches se sont concentrées sur la modélisation des technologies CCUS dans les modèles d'évaluation intégrée (IAM) que sont TIAM-FR et EPPA, respectivement développés par le Centre de Mathématiques Appliquées de Mines Paris – PSL et le Massachusetts Institute of Technology (MIT).

Nous avons modélisé le CCUS dans les secteurs de l'électricité, de l'hydrogène, de l'industrie et des bioraffineries, puis directement de l'air (DAC) et enfin l'utilisation du CO2 pour produire des minéraux et des carburants synthétiques (essence, diesel, méthanol, méthane, et carburéacteurs). Nous utilisons ces modèles pour évaluer le rôle et le potentiel de CCUS dans la transition énergétique mondiale. Plus précisément, nous abordons trois questions de recherche 1) Quels sont les facteurs qui permettent l'utilisation du CO2 de contribuer de manière significative à la réduction des émissions ? 2) Sous quelles conditions le DAC se déploie à grande échelle et pour quelles

conséquences ? 3) Quel est le rôle et le potentiel de l'utilisation du CCUS et pour décarboner l'industrie ?

Nos résultats révèlent que le potentiel de l'utilisation du CO₂ est sensible aux incertitudes sous-jacentes à son coût, mais aussi au coût de l'hydrogène. En outre, le potentiel d'utilisation du CO₂ diminue à mesure que le stockage du CO₂ devient coûteux et que le DAC devient bon marché. Ainsi, le potentiel du CCU est incertain, mais peut s'avérer important pour l'industrie ou l'aviation. En ce qui concerne le DAC, cette technologie contribue de manière significative aux ambitions à condition que son coût soit inférieur à 400 \$/tCO₂, en particulier lorsqu'il n'existe pas de système international d'échange de permis d'émission (ETS). En effet, nous avons mis en évidence des potentiels de DAC plus importants dans les pays d'Asie disposant

de peu de ressources terrestres et biomasse, comme la Chine, le Japon, l'Inde, ou encore la Corée du Sud. Sans ETS, ces pays ne peuvent pas acheter des permis d'émissions à d'autres pays et se retrouvent à devoir compenser leurs propres émissions par des émissions négatives générées par DAC. Enfin, les émissions négatives générées par les industries du ciment et de l'acier représentent un potentiel conséquent. D'ailleurs, le CCS reste la seule solution pour lutter contre les émissions de CO₂ des procédés de l'industrie. Si les résultats de EPPA et de TIAM-FR pour atteindre l'objectif net zéro d'ici 2070 diffèrent en termes de capacités de CCUS et de déploiement temporel, les conclusions sont similaires : le CCS et les émissions négatives sont nécessaires pour réaliser la transition. Cependant, utiliser le CO₂ est moins efficace et nécessaire que de le stocker sous terre.



6.4.5 Conclusion et propositions pour l'avenir

L'année 2024 sera fortement orientée vers la mise en œuvre du projet portant sur la mise en corrélation des données matériaux et conflits, et donc au développement de la méthodologie d'extraction de ces données et de la conception de l'outil.

Les membres de l'axe 4 poursuivront leur participation aux divers événements organisés par TTI.5 et à la valorisation des travaux des élèves et des chercheurs s'insérant dans les thématiques abordées par l'axe.

RAPPORT D'ACTIVITÉ 2023

The Transition Institute 1.5
Mines Paris - PSL
60 boulevard Saint Michel
75272 PARIS cedex 06

 www.the-transition-institute.minesparis.psl.eu

 tti.5@minesparis.psl.eu

Directrice de la publication

Nadia MAÏZI

Coordinatrice de la publication

Claire CAUMEL

Rédaction

Claire CAUMEL, Cédric STANGHELLINI et Sabrina BEKLI

Maquette

Alice SPASARO

Contributeurs au Rapport par Axes de recherche TTI.5

Edi ASSOUMOU (CMA)
Laurent AUBANEL (MAT)
Séverine BOYER (CEMEF)
Claire CAUMEL (TTI.5)
Francesco DELLORO (MAT)
Lucas DESPORT (CMA)
Cathy DESCAMPS-LARGE (ISIGE)
Petr DOKLADAL (CMM)
Pierre FLECKINGER (CERNA)

Nicolas FLIPO (GEOSCIENCES)
Phillipe LEFEBVRE (CGS)
Nadia MAÏZI (TTI.5 et CMA)
Charbel MOUSSA (CEMEF)
Bruno PEUPORTIER (CES)
Antoine PREVET (CERNA)
Bruno SCALABRINO (UCA)
Sandrine SELOSSE (CMA)
Claude TADONKI (CRI)

NOUS SOUTENIR

Fondation Mines Paris
60, boulevard Saint-Michel
75272 Paris Cedex 06



www.fondation.minesparis.psl.eu
fondation@minesparis.psl.eu
01 40 51 90 16