



IFU

ilots de fraîcheur urbains

Projet proposé par :

3 partenaires scientifiques & 1 partenaire opérationnel

Laboratoire de recherche en architecture (LRA)	Office national d'études et recherches aérospatiales (ONERA)	Laboratoire matériaux et durabilité des constructions (LMDC)	Communauté urbaine Toulouse Métropole
---	---	---	--

dans le cadre de l'appel à projets
de recherche et développement 2012

Évaluation de dispositifs de rafraîchissement urbains
Axe 2. Évaluation du potentiel d'économie d'énergie
grâce aux dispositifs de rafraîchissement urbains

conduit par l'ADEME

Novembre 2012

A. Le projet de recherche

A1. Problématique générale

La Ville est probablement aujourd'hui la plus complexe invention de l'homme. Il s'y concentre plus de la moitié de la population à l'échelle du globe, plus de 80% à l'échelle des pays industrialisés. Les enjeux urbains sont très nombreux et souvent conflictuels. La conception ou la gestion de ces systèmes urbains, par essence chaotiques, appelle à de nouveaux outils de modélisation intégrant toute la complexité et la multidisciplinarité notamment à l'échelle des métropoles mondiales. Ce développement urbain généralisé est accompagné (et contribue largement à) d'un changement climatique accéléré à l'échelle de l'humanité. Ses effets sur la consommation énergétique et sur la santé publique sont plus prégnants dans ces grandes métropoles. Ceci oblige à intégrer dès la conception des projets, une analyse des dispositifs d'atténuation de ces phénomènes et de travailler sur une adaptabilité des espaces urbains. Pour répondre à ces enjeux, plusieurs pistes d'actions concomitantes sont nécessaires dont : 1) Agir sur le bâtiment ; 2) Agir sur l'espace public ; 3) Développer des méthodes globales d'analyse des projets.

1) Agir sur le bâtiment.

Les labels énergétiques et les réglementations thermiques (en France : RT 2000, 2005, 2010...) ont rapidement évolué ces dernières années. Ils poussent peu à peu à la construction de bâtiments de plus en plus économes en chauffage pendant la saison froide. Dans différents pays européens, les bâtiments neufs sont de mieux en mieux isolés thermiquement. Les volumes habités tendent par ailleurs à devenir de plus en plus compacts. Les enveloppes sont de plus en plus étanches. Les ouvertures sont de mieux en mieux orientées pour capter l'ensoleillement pendant la saison froide.

Toutefois, ces mêmes bâtiments économes l'hiver tendent à surchauffer lorsque que la saison devient clémente¹. Dans le sud de l'Europe, les problèmes de surchauffes dans le logement et dans le tertiaires sont courants. Si nous prenons le cas de constructions qui ont reçu le label *bâtiment de basse consommation énergétique*², des logements collectifs dans la région toulousaine peuvent par exemple connaître des surchauffes pendant 7 à 9 mois de l'année. Le risque est encore plus important pour les immeubles de bureaux et certains locaux professionnels. Ce problème de surchauffe des bâtiments bien isolés se pose globalement pour toutes les régions du sud de l'Europe. Il commence à être abordé dans la RT 2012. Plus globalement, il est devenu une préoccupation grandissante dès lors que l'on met en application une exigence (label, réglementation) plus ou moins alignée sur les principes du label allemand PassivHaus³.

2) Agir sur l'espace public

Les espaces publics urbains sont trop souvent conçus en creux des zones d'habitation. Ils sont pourtant des lieux privilégiés d'atténuation ou de modération des changements climatiques. Ils permettent à la fois de reconstituer le cycle naturel de l'eau sur des sites fortement anthropisés ; et d'apporter ombrage, évaporation et évapotranspiration ; de canaliser les vents et/ou d'accélérer la dilution des polluants nombreux dans l'air de la ville. Ils sont le prolongement naturel des espaces intérieurs et participent aussi au confort global et kinesthésique des espaces urbains.

1 Voir le rapport basé sur une enquête de terrain réalisée depuis 2011 dans 211 opérations, labellisées BBC ou équivalent, menée par l'Agence Qualité Construction dans le cadre du programme « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » : www.reglesdelart-grenelle-environnement-2012.fr > rapport REX BBC & Risques

2 Label officiel BBC 2005 : se référer à l'arrêté du 3 mai 2007 relatif au contenu et aux conditions d'attribution du label « haute performance énergétique »

3 Site officiel du label PassivHaus : www.passiv.de

3) Développer des méthodes globales d'analyse des projets.

Les outils traditionnels de l'ingénierie environnemental visent à optimiser un jeu limité de contraintes sur une portion du système urbain et pour des variables endogènes. Ils peuvent profiter des avancées de l'aide à la décision multicritères pour alimenter des outils visant à la synthèse sous forme de systèmes d'indicateurs urbains permettant l'intégration de différents résultats de simulation disciplinaires et des effets de variables exogènes.

Le projet *ilots de fraîcheur urbains* (IFU) s'attachera à améliorer les connaissances pour répondre à cette préoccupation grandissante des risques de surchauffes. Il visera plus précisément à **comparer de manière simplifiée et synthétique (ordres de grandeurs) différentes stratégies bioclimatiques d'adaptation en saison chaude qui se décident au démarrage de la conception des projets urbains, paysagers et architecturaux.**

Du point de vue physique, le projet IFU se basera tout particulièrement l'amélioration des rafraîchissements naturels des îlots urbains par la prise en compte ou l'optimisation des **propriétés radiatives mesurées in-situ** : effets de masques du bâti, de la couverture végétale, de la présence d'eau, des matériaux d'aménagements et d'enveloppes...

Pourquoi au démarrage de la conception des projets ?

Nombre d'équipements ou de systèmes techniques pour compenser la surchauffe de nos habitats (ventilations et climatisations mécaniques, protections solaires mobiles, vitrages sélectifs...) rencontrent rapidement des limites dans leur mise en œuvre et leur utilisation. Ils génèrent globalement des coûts d'investissement puis de maintenance et d'entretien difficiles, voire impossibles à financer selon les maîtres d'ouvrages.

Le projet IFU part du principe qu'il est essentiel de commencer par concevoir des espaces publics et des bâtiments bien parés pour le confort en saison chaude. Dans des quartiers et des habitats conçus de manière adaptée aux périodes chaudes, le recours à des équipements et systèmes techniques devient moins systématique et plus sobre, ce qui devient l'esprit des nouvelles réglementations thermiques où le recours au rafraîchissement est limité.

Pourquoi une comparaison des différentes stratégies d'adaptation en saison chaude ?

Dans les projets contemporains en France, les urbanistes, ingénieurs, architectes intègrent rarement les risques de surchauffes avec méthode. Les concepteurs disposent généralement de quelques connaissances bioclimatiques sur l'intérêt de tel ou tel dispositif urbain ou architectural. Il reste toutefois difficile à ce jour de dégager une vision globale de tous les leviers dont on dispose pour réduire les risques de surchauffes. Il est encore plus difficile, dans l'état des connaissances actuelles, d'évaluer et comparer globalement, ne serait-ce qu'avec quelques ordres de grandeurs, le gain de chaque dispositif urbain ou architectural contre la sensation d'inconfort thermique.

À titre d'illustration, à l'échelle des projets d'aménagements, nous rappelons ici quelques dispositifs urbains :

- les revêtements des sols (terre stabilisée, enrobés, bétons, roches...),
- les différents types de végétations (au sol, arbustives, en hauteur...),
- les gabarits, les formes, les implantations du bâti (morphologie urbaine),

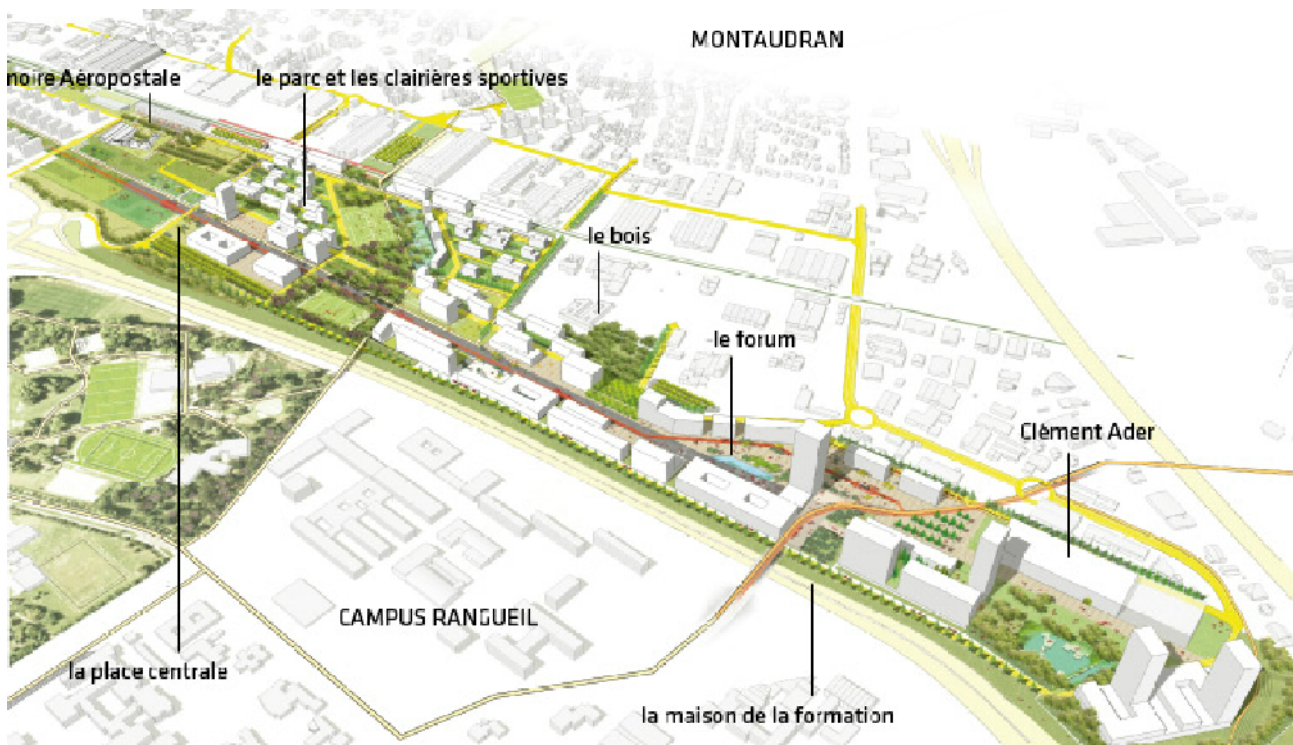
- les présences d'eaux sur le site (pluie, cours d'eau, eaux grises traitées...).

Dans le même sens, à l'échelle du bâti, les dispositifs architecturaux suivants peuvent être cités :

- la protection solaire : des espaces de vie extérieurs (cheminements, jardins, patios, loggias, balcons, terrasses, vérandas...), des ouvertures, des toitures, des façades,
- la ventilation naturelle : ouvertures pour l'échappement des masses d'air chaud dans l'habitat, passages de flux d'air pour le rafraîchissement nocturne, passages de flux d'air favorables à l'évapotranspiration au niveau de la peau des habitants,
- l'inertie thermique : phénomènes de déphasage avec les pointes de température de l'air au cours de la journée,
- l'évaporation et le stockage d'humidité dans les matériaux intérieurs.

A2. Terrain d'étude : Montaudran Aerospace

Le terrain d'étude du projet IFU est la zone d'aménagement concertée (Zac) Montaudran Aerospace. La Communauté urbaine Toulouse Métropole, maître d'ouvrage de la Zac, est partenaire du projet IFU. Il s'agit d'un projet urbain de 50 hectares d'aménagements d'espaces publics (zone d'intervention) et 300 hectares d'études urbaines (zone d'étude directement concernée par les interventions).



Source image : <http://www.seura.fr>, site de l'agence SEURA (David Mangin) en charge du projet de la Zac Montaudran Aerospace

Nous récapitulons maintenant les différents aspects qui nous ont amené à arrêter ce terrain d'étude pour le projet IFU.

Quels intérêts pour le projet IFU ?

Quartier-campus symbolique, chargé d'histoire locale

Bureaux, laboratoires de recherche, locaux professionnels, logements, notamment pour les étudiants et les chercheurs, services communs, équipements sportifs et de loisirs, commerces de proximité... à la fois campus universitaire, plateforme de recherche, quartiers résidentiels, lieux de loisirs et de

promenades, situé au sud-Est de Toulouse, Montaudran Aerospace est conçu autour de la piste de l'Aéropostale, mystifiée entre autre par des pilotes comme Mermoz et Saint Exupéry. Ce nouveau campus dédié à l'aéronautique, sera la vitrine internationale des compétences aéronautiques et spatiales de la métropole toulousaine.

Projet de vitrine internationale, très en vue

Ce projet s'inscrit dans la continuité du complexe scientifique de Rangueil où se trouvent déjà l'ISAE, l'ENAC, l'INSA Toulouse, l'Université Paul Sabatier, le LAAS-CNRS, le CNES... et à proximité d'acteurs importants tels que Airbus, Alcatel Space, EADS Astrium, Freescale, Latécoère, Siemens VDO Automotive, Thales. Montaudran Aerospace sera donc l'ensemble constitué par cette nouvelle zone en développement et l'actuel complexe de Rangueil :

- rassemblement des deux écoles aéronautiques toulousaines, l'ISAE et l'ENAC, ainsi que des universités et instituts universitaires se situant dans la même zone géographique : l'Université Paul Sabatier, l'INSA de Toulouse et l'INPT.
- regroupement de 1000 chercheurs issus essentiellement de l'ONERA, du CCR EADS, du CNRS, et du CNES.
- réalisation d'infrastructures nécessaires au développement des PME et offre de moyens services communs.

Ambition environnementale autour des transports

Montaudran Aerospace vise des transports en commun et des déplacements doux facilités. L'ambition du projet est d'offrir un espace urbain intégré au reste de l'agglomération. Le projet met en avant la préservation du patrimoine de l'Aéropostale : dix hectares devraient y être dédiés et certains bâtiments historiques seront conservés (salle des cartes, Château Petit Raynal).

Ambition paysagère et environnementale autour de la biodiversité

Une approche paysagère raisonnée est sensée faciliter la biodiversité sur le site. La piste a été proposée dans le projet urbain initial sous forme de trame végétale, les clairières sportives, le bois, un parc de loisirs, soit un corridor vert qui s'étendrait du nord au sud. Les quartiers seront organisés au bord de la clairière. Les immeubles seront positionnés en quinconce afin de bénéficier de vues sur la piste et les parcs.

Ambition d'une empreinte écologique réduite

La Communauté urbaine Toulouse Métropole a programmé une mixité entre activités et logements pour limiter les déplacements des habitants. Des transports en commun et une incitation aux modes doux sont attendus. La végétation sera réintroduite. La gestion des eaux de pluie sera l'objet d'une attention particulière pour favoriser les zones humides propices à la biodiversité. Les programmes exigeront des projets économes en énergie, avec une conception bioclimatique des bâtiments et la mise en place d'énergies renouvelables.

Période clé où la maîtrise d'ouvrage à besoin d'être conseillée

Le maître d'ouvrage, la Communauté urbaine Toulouse Métropole, pousse à faire de Montaudran Aerospace un quartier durable. Le maître d'oeuvre, l'architecte urbaniste David Mangin de l'agence SEURA, fait peu à peu évoluer le projet lauréat depuis qu'il l'a remporté par concours en 2010. Les tous premiers chantiers ont démarré. La finalisation du projet est fixée à 2019. Nous abordons ainsi une période clé dans le déroulement de ce projet pour lequel la Communauté urbaine Toulouse Métropole (maître d'ouvrage, partenaire du projet IFU) et les architectes urbanistes de l'agence SEURA (David Mangin, maître d'oeuvre) ont besoin d'être conseillés pour opérer des choix. Nombre de questions se posent actuellement sur des choix cruciaux pour le comportement énergétique (consommations et empreintes) du quartier :

- la minéralisation de l'ancienne piste de l'Aéropostale, envisagée par certains et contradictoire avec le choix initial d'une trame végétale, aurait vraisemblablement un impact conséquent

- sur le micro-climat urbain.
- à l'échelle des aménagements, nombre de choix sur les emplacements, les revêtements, la végétation, le mobilier urbain, sont à faire évoluer en fonction, entre autre, de leurs impacts sur le confort des cheminements doux dans le quartier.
- à l'échelle des bâtiments, différents concours vont être lancés pour la réalisation de logement, de bureaux, d'équipements. Des préconisations précises, dans ce précis de nouveau quartier à Toulouse, sur la conception bioclimatique pourraient être décisives.

Autrement-dit, les attendus de l'appel à projets « Évaluation de dispositifs de rafraîchissements urbains », conduit par l'ADEME, a directement incité les partenaires toulousains du projet IFU, dont la Communauté urbaine Toulouse Métropole, à étudier scientifiquement à la faisabilité (et pourquoi pas aider à la prédiction) d'ilots de rafraîchissement urbains dans ce quartier-campus de Montaudran Aerospace.

L'Institut de la Ville, lieu de mutualisation des nombreux savoirs universitaires travaillant à Toulouse sur la Ville permettra l'intégration des différentes composantes de ce projet dans une recherche interdisciplinaire collaborative.

A3. Méthode d'investigations

Le projet IFU vise à étudier au mieux différents scénarios bioclimatiques dans le projet urbain de Montaudran Aerospace, en allant des grands aménagements jusqu'à l'intérieur des bâtiments.

La méthode de travail peut être explicitée grâce au recours complémentaire de :

- (1) un enchaînement, à différentes échelles, d'études de phénomènes micro-climatiques,
- (2) une analyse multicritères.

Enchaînement, à différentes échelles, d'études de phénomènes micro-climatiques

Le partenariat scientifique du projet IFU a été mis en place pour maîtriser au mieux et pour pouvoir échanger directement sur place, à Toulouse, un savoir-faire pour l'étude et la manipulation d'outils complémentaires de la physique du micro-climat et de la thermique dans l'habitat. Dans le cadre de l'Institut de la ville qui vise à mutualiser les savoirs scientifiques, trois laboratoires s'engagent dans le projet IFU, l'ONERA, le LMDC et le LRA, à partager des savoir-faire sur la convergence des outils. Ces savoir-faire permettent, à travers différents niveaux d'optimisation, de dégager une vision intégrée, depuis l'échelle du quartier jusqu'à celle du bâti, des phénomènes radiatifs et thermo-aérauliques.

- mesure spectrale par vidéo embarquée sur avion complétée par des mesures *in situ* :** le laboratoire ONERA est l'une des composantes essentielles de l'expertise scientifique spatiale à Toulouse. Il a ainsi une expérience rare sur différents domaines dont l'observation spatiale de la surface terrestre. L'ONERA a développé de multiples méthodes de caractérisation et d'identification de la signature spectrale des constituants de la surface terrestre. Les interactions rayonnement-atmosphère, effet perturbateur de l'atmosphère, doit être pris en considération dans l'interprétation du signal mesuré par le satellite. L'ONERA est ainsi habitué à croiser des mesures satellitaires avec des méthodes de mesure spectrale embarquées sur des avions, complétées par des mesures sur site. L'ancienne piste de l'Aéropostale, lieu du projet Montaudran Aerospace, étant voisine de l'ONERA, elle a été régulièrement mesurée avec des systèmes embarqués sur des avions du site. Notons que ces mesures embarquées permettent d'aborder la délicate question physique de l'influence des phénomènes d'évaporation (au niveau de la végétation, au niveau de différents dispositifs de présence d'eau).

- **simulation des échanges radiatifs à l'échelle d'un quartier :**
les mesures spectrales embarquées de la surface du quartier Montaudran Aerospace se réalisent à de rares instants précis : ceux des passages d'avions appareillés. Les mesures *in situ* permettent de recalibrer l'interprétation de mesures embarquées. L'ensemble de ces mesures, embarquées et *in situ*, servent à caler ensuite des simulations numériques des échanges radiatifs qui permettent d'intégrer les variations climatiques qui caractérisent des journées en saison chaude. Ces simulations permettent globalement de comprendre, au cours d'une période chaude, le bilan radiatif des sols extérieurs, des couvertures végétales, des enveloppes du bâti. Ces simulations permettent des études ciblées à différentes échelles : celle du quartier, celle de l'îlot, celles des aménagements publics et celle de l'enveloppe des bâtiments.
- **simulation des phénomènes thermo-aérauliques à l'échelle de l'îlot :**
elle consiste à coupler les variations spectrales de la surface des sols et végétations des espaces extérieurs et des enveloppes des bâtiments avec les phénomènes thermiques convectifs et les phénomènes aérauliques (induits par le vent). Des savoir-faire, basés sur l'utilisation de différents outils (CFD de type FLUENT, couplage de SOLENE à des modèles thermo-aérauliques développés à l'ONERA), sont présents au sein des 3 laboratoires partenaires du projet IFU : l'ONERA, le LMDC et le LRA.
- **simulation thermique dynamique à l'échelle du bâtiment ⁴:**
elle étudie les phénomènes de transfert de chaleur et de masse dans les espaces habités caractérisés, d'une part, par des imprécisions importantes liées à l'incertitude et à la variation temporelle des paramètres et, d'autre part, par l'adaptation thermique due à la présence humaine. L'approche utilisée dans le projet IFU est l'analyse fine des phénomènes de transferts thermiques, aérauliques et hydriques à partir de l'outil TRNSYS utilisé par des membres du LMDC et du LRA.

Méthode globale : l'analyse multicritères ^{5 6 7 8}

Le projet IFU vise à mettre en place une méthode d'analyse multicritères de différents dispositifs bioclimatiques urbains et architecturaux. Remarque : ces dispositifs ont déjà été listés à la fin de la partie A1 (sols, végétation, bâti, eaux, protection solaire, ventilation naturelle, inertie thermique : phénomènes de déphasage avec les pointes de température de l'air au cours de la journée, humidité dans les matériaux...).

4 Quelques travaux récents de notre équipe :

S. Ginestet, D. Marchio « Retro and on-going commissioning tool applied to an existing building: operability and results of IPMVP », *Energy*, 2010, vol. 35, p.1717–1723

S. Ginestet, D. Marchio and O. Morisot « Evaluation of faults impacts on energy consumption and indoor air quality on an air-handling-unit », *Energy and Buildings*, 2008, vol. 40 (1), p.51-57

S. Ginestet et al, « Mise en place d'une méthode inverse à partir d'un modèle dynamique sous contraintes en approche simplifiée : approche physique », rapport intermédiaire du projet ANR-HABISOL AMMIS (Analyses multicritères et méthode inverse en simulation énergétique du bâtiment), janvier 2010, 68 pages

5 SAGACités, 2002 : Vers un Système d'aide à la Gestion des Ambiances urbaines. (en partenariat avec le TMU, le groupe ABC, l'IRPHE, et le laboratoire de Psychologie de l'Environnement –Paris V), Rapport final, GRECO, 450 p, Février 2002.

6 ROUSVAL 2004, Benjamin, Impact environnemental des transports, vers un système d'aide à la décision multicritère. Bourse INRETS. Décembre 2004.

7 PIE 2006, Prospective de l'Impact Environnemental des Transports (PIE) : l'Aide à l'évaluation environnementale des systèmes de transport, Rapport final, Tome 2, Propositions, 200 p., ADEME- INRETS, Juillet 2006 & Tome 1, Analyse bibliographique, 61p., ADEME- INRETS, Mai 2006

8 EUREQUA, 2011, Projet lauréat de l'ANR Villes Durables en 2011, auquel participe le LRA.

La méthode globale du projet IFU ressortira donc des méthodes d'agrégations de critères caractéristiques de ces dispositifs bioclimatiques.

L'aide à la décision offre en effet un paradigme innovant pour développer des outils qui permettent une plus-value décisionnelle pour les opérateurs urbains, à partir de la définition d'un ensemble d'actions urbaines, de la construction d'un ensemble d'indicateurs pertinents pouvant être instanciés par des outils de modélisation environnementale, et de la proposition d'une approche opérationnelle visant à l'agrégation de leurs préférences. Ces outils offrent aujourd'hui une opérationnalité intéressante sur les projets complexes comme les projets urbains.

Nous espérons ainsi échafauder un outil qui permettra de comparer différentes stratégies urbaines et architecturales de conception bioclimatiques, en intégrant la combinaison des différents dispositifs depuis l'échelle des espaces publics jusqu'à celle de l'intérieur des bâtiments.

A4. Perspectives en termes de production de connaissances

Les savoir-faire bioclimatiques ont beaucoup évolué depuis deux à trois décennies. Dans le domaine de l'ingénierie environnementale, ils se sont dispersés en une diversité de connaissances segmentées sur les apports solaires, l'isolation extérieure sans ponts thermiques, la protection solaire, la ventilation et le rafraîchissement par phénomènes convectifs, l'éclairage naturel et les ambiances lumineuses, le recours à l'inertie intérieure, l'étanchéité des enveloppes, la régulation par stockage et évaporation dans les matériaux hygrophiles, l'empreinte énergétique des matériaux et leurs procédés de mise en œuvre... Au delà des exigences énergétiques sur la thermique d'hiver, la thermique d'été et la lumière, il est aussi important d'anticiper sur des méthodes de mieux en mieux maîtrisées sur les empreintes énergétiques des matériaux et leurs procédés, et aux échelles urbaines aux empreintes énergétiques des eaux usées, des mobilités et des productions alimentaires.

Face à la complexité que pose l'agrégation de ces différentes expertises environnementales, le projet IFU permettra de faire évoluer des connaissances bioclimatiques tant du point de vue de la physique que du point de vue de l'ingénierie et de la conception architecturale et urbaine. Concrètement, il prendra en exemple différents projets d'aménagements urbains et de bâtiments afin qu'ils servent de références à d'autres concepteurs. Il avancera par ailleurs différentes connaissances pour savoir mieux caractériser l'intérêt de tel ou tel dispositifs urbain ou architectural sur le rafraîchissement passif.

Du point de vue de la physique

En termes de résultats attendus : nous allons estimer le rafraîchissement induit lorsque l'on agit sur les propriétés radiatives des aménagements et des enveloppes et sur la morphologie urbaine. Nous étudierons conjointement des phénomènes micro-climatiques et des échanges thermiques dans le bâti. Afin de comparer l'influence de dispositifs bioclimatiques urbains et architecturaux très différents, nous mettrons en place de représentations simplifiées et synthétiques de grandeurs physiques. Cet exercice exigera une vigilance accrue sur l'estimation des incertitudes induites par chaque représentation simplifiée et synthétique d'une grandeur physique. Les imprécisions ne sont en général pas gênante, si l'on ne s'intéresse pas à la valeur exacte et que l'on veut juste savoir si deux grandeurs sont comparables ou pas. La connaissance de l'ordre de grandeur d'un ensemble de phénomènes permet ainsi de comparer si l'effet de rafraîchissement entre telle et telle stratégie bioclimatique est intéressant ou pas.

Du point de vue de l'ingénierie

Du point de vue de l'ingénierie, le projet IFU contribuera à consolider des démarches d'ingénierie au

service de la conception urbaine et architecturale. Il ne s'agit pas de méthodes de travail où l'on exécute un ensemble complexe de recettes objectives et immuables. Il s'agit plutôt de démarches transversales où l'on explicite des méthodes de travail en fonction des caractéristiques de chaque contexte d'étude rencontré. Autrement dit, le projet IFU contribue à la l'idée que l'ingénierie environnementale gagnerait à évoluer à travers différents paradigmes complémentaires. L'idée est d'élaborer des démarches transversales (donc nécessairement simplifiées et synthétiques) et adaptatives à chaque nouveau contexte. Cela permet de répondre, grâce à une vision globale, à des enjeux environnementaux (ce que ne permet pas une approche concentrée sur un phénomène physique et/ou sur un dispositifs urbains ou architecturaux).

Du point de vue de la conception urbaine et architecturale

Du point de vue de la conception des projets urbains et architecturaux, le projet IFU permettra de comparer l'efficacité en saison chaude de différents scénarios bioclimatiques. Chaque scénario étant la combinaison à différentes échelles de dispositifs urbains et architecturaux, le projet IFU permettra aussi la revisite et la synthèse de savoir-faire rarement maîtrisés par les concepteurs (architectes, ingénieurs, comme urbanistes). Notons que ces savoir-faire seront largement transposables à de nombreux contextes du sud de l'Europe.

En tant que maître d'ouvrage de la Zac Montaudran Aerospace, la Communauté urbaine Toulouse Métropole est le partenaire opérationnel du projet IFU. Celle-ci souhaite disposer d'arguments prédictifs sur le confort et les consommations énergétiques. Elle espère ainsi opérer des choix dans l'évolution de ce projet urbain et des projets architecturaux qui s'y construiront d'ici 2019.

Du point de vue de l'approche globale des projets complexes

La prise en compte simultanée de différents modes d'évaluation dans des approches transversales répond au caractère synthétique des solutions aux problèmes complexes. Il permet de passer du contexte limité de projets urbains à celui plus stratégique et intégrateur de projets de ville .

B. Les perspectives de valorisation

B1. Diffusion et publication des produits de la recherche

Il est difficile à ce jour d'établir le nombre de publications induites par les activités de notre projet IFU. Nous visons la conduite de 4 post-doctorats, soit des profils de chercheurs généralement habitués aux publications scientifiques et qui ont souvent un intérêt personnel à produire des publications de qualité. Nous envisageons *a minima* 4 publications dans des colloques internationaux et tenterons 4 autres dans des revues internationales à comités de lecture.

B2. Communication électronique des produits de la recherche

Le projet urbain de la Zac de Montaudran Aerospace est conduit par l'un des partenaires du projet IFU, la Communauté urbaine Toulouse Métropole. Notre projet IFU vise à assister de manière pragmatique et réaliste les choix de ce projet urbain. Cela se concrétisera par des préconisations bioclimatiques favorables au rafraîchissement au niveau des aménagements publics et paysagers ainsi que de la conception des futurs bâtiments.

En fonction de la réussite de cette assistance pragmatique et réaliste, des informations à contenu scientifique du projet IFU pourront servir à la communication de Toulouse Métropole : explicitation de choix à travers les médias électroniques (sites Internet de la ville, de la Zac, communiqués de presse...) utilisés par cette Communauté urbaine pour informer les habitants et faire valoir la pertinence de sa politique urbaine.

B3. Valorisation en productions pédagogiques au sein des établissements

En terme d'innovation pédagogique, le projet IFU profite de différentes imbrications avec des enseignements de l'Université de Toulouse. Le LRA est le laboratoire qui regroupe l'ensemble de la recherche de l'École nationale supérieure d'architecture (ENSA de Toulouse) et le LMDC est le laboratoire orienté génie civil à l'Institut national des sciences appliquées (INSA de Toulouse). Ces deux porteurs du projet IFU sont en relation directe avec un ensemble, rare en France, de formations à l'interface entre l'ingénierie et l'architecture : double parcours ingénieur-architecte, master génie urbain, post-master de spécialisation, formation continue.

À l'ENSA de Toulouse, le projet IFU a globalement un rôle fédérateur de l'équipe enseignante largement renouvelée ces dernières années et en charge des enseignements « sciences et techniques » et « ateliers de projet investissant les problématiques du développement durable ». Concrètement, il s'agira de partager, amender, consolider un ensemble de savoir-faire entre différents enseignants. Au niveau des cours existants, il s'agira de faire évoluer les connaissances des étudiants sur les savoir-faire de l'architecture et de l'urbanisme bioclimatique.

À l'INSA de Toulouse, le projet IFU contribuera par l'évolution de cours et travaux dirigés de la filière Génie urbain, une orientation transversale au sein des départements de génie civil et de génie de procédés. Il s'agit d'une filière offerte aux étudiants-ingénieurs de l'INSA de Toulouse et représentative de priorités pédagogiques soutenues au sein de l'école.

B4. Perspectives de valorisation et d'implication au sein des études post-doctorales

Le *Pôle régional d'enseignement supérieur (PRES) Université de Toulouse* connaît une solide réputation, notamment des domaines scientifiques de la physique et de la chimie associés à des activités opérationnelles de l'aéronautique, du spatial, de la chimie et de la médecine. C'est un PRES particulièrement attractif avec environ 120.000 étudiants.

Dans ce contexte universitaire concurrentiel, le projet IFU constituera une identification forte de la culture urbaine dans le milieu structuré et la recherche universitaire toulousaine. Il fera évoluer des expertises du LRA (Ensa de Toulouse) et valorisera des relations avec le LMDC (Insa de Toulouse, Université Paul Sabatier Toulouse 2) et l'ONERA.

Le projet IFU prévoit la réalisation de 4 post-doctorats. Nous espérons ainsi initier entre l'ONERA, le LMDC et le LRA des relations scientifiques avec un bon niveau de maturité sur une approche atypique qui favorise une vision globale et réaliste, soit une démarche de simplification et de synthèse aujourd'hui importante à faire passer dans la culture des physiciens.

Plus généralement, l'une des motivations du projet IFU est de faire valoir et partager des spécificités scientifiques propres à l'urbanisme au sein de l'ensemble des partenaires de l'Institut de la ville (IdV).

B5. Hypothèses de diffusion dans les milieux professionnels de l'aménagement

À travers notre projet, nous visons à synthétiser et reformuler de manière opérationnelle des savoir-faire qui sont attendus au sein de la formation continue Architecture, environnement et développement durable (AEDD)⁹. Il répond précisément à une évolution majeure des demandes de ses anciens stagiaires.

Plus concrètement, le projet IFU vise une double retombée :

- dynamiser les anciens stagiaires de la formation continue AEDD par la mise à jour de leurs connaissances (site Internet de mise à niveau, conférences-débats, propositions de modules de formations courtes ciblées),
- faire évoluer l'attractivité et les applications opérationnelles des savoir-faire transmis au cours des prochaines sessions de la formation continue AEDD.

⁹ La 8^{ème} session de la formation longue (une trentaine de jours sur l'année) AEDD vient de s'achever avec, à ce jour, plus de 200 architectes en exercice formés dans le sud-ouest de la France. Elle est organisée à l'ENSA de Toulouse, conjointement avec le Conseil régional de l'Ordre des architectes de Midi-Pyrénées (CROAMP). Il s'agit, pour l'ENSA de Toulouse, d'un succès sans précédent de l'ensemble de ses formations continues des architectes en France.

C. L'équipe de recherche

C1. Nom et qualité du responsable scientifique de l'équipe

Frédéric Bonneaud

École nationale supérieure d'architecture - Laboratoire de recherche en architecture
83 rue Aristide Maillol - BP 10629 - 31106 Toulouse cedex 1
Tél. direct : 33 (0)6 75 87 09 72
Tél. secrétariat LRA : 05 62 11 50 40
Fax : 33 (0)5 62 11 50 49
Courriel : frederic.bonneaud@toulouse.archi.fr
<http://www.toulouse.archi.fr>

- Professeur à l'ENSA de Toulouse
- Architecte, docteur de l'Université de Nantes (sciences pour l'ingénieur)
- 5 thèses co-encadrées ou en cours d'encadrement
- 2 rapports de thèses de doctorat

Responsable au Laboratoire de recherche en architecture (LRA) du champs thématique *Environnement, construction, ambiances* dont l'activité actuelle se caractérise par une quinzaine de projets financés en cours.

C2. Nom et qualité du responsable institutionnel de l'équipe

Luc Adolphe

Institut national des sciences appliquées – Département Génie civil et urbain
135 avenue de Ranguéil 31077 Toulouse cedex 4
Tél. direct : 33 (0)6 85 67 95 85
Fax : 33 (0)5 61 55 99 00
Courriel : luc.adolphe@insa-toulouse.fr
<http://www.insa-toulouse.fr>

- Professeur des universités à l'INSA de Toulouse
- Ingénieur TPE, Architecte, docteur de l'EMP, HDR
- 16 thèses de doctorat encadrées, co-encadrées ou en cours d'encadrement
- 7 rapports de thèses de doctorat ou d'habilitation à diriger des recherches

Porteur du projet d'Institut de la Ville, en partenariat avec le PRES Université de Toulouse et la Communauté urbaine du Grand Toulouse.

Initiateur et responsable de l'option Génie urbain en 5ème année à l'INSA de Toulouse.

C3. Composition de l'équipe de recherche

Notre projet IFU est porté institutionnellement par le Laboratoire de Recherche en Architecture (LRA). Il vise plus particulièrement à mettre en avant la recherche en urbanisme par des collaborations entre membres du LRA, de l'ONERA, du LMDC et la Communauté urbaine Toulouse Métropole.

LRA : Laboratoire de recherche en architecture à l'Ensa de Toulouse

Le LRA réunit toutes les démarches scientifiques développées au sein de l'École nationale supérieure d'architecture (Ensa de Toulouse). Il regroupe une cinquantaine de d'enseignants impliqués dans la recherche à des degrés divers et une vingtaine de doctorats en cours. Il connaît depuis 2009 l'arrivée de 4 enseignants titulaires et une enseignante associée qui ont tous un lien étroit avec la culture technique en général et environnementale en particulier. Le projet IFU est une opportunité pour favoriser une dynamique de recherche et de pédagogie innovante pour l'ensemble de ce nouveau groupe d'enseignants.

LMDC : Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions à l'INSA de Toulouse et l'Université Paul Sabatier-Toulouse 3

Le Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC) est un laboratoire universitaire de recherche dans le domaine de la science des matériaux du génie civil. Il propose des solutions scientifiques permettant un développement durable et une gestion éco responsable du patrimoine immobilier, infrastructures de génie civil et habitat.

Outre Luc Adolphe (Professeur des universités) qui est chercheur au LRA et associé au LMDC, quelques enseignants-chercheurs ont pour habitude de travailler avec des membres du LRA.

ONERA : Office national d'études et recherches aérospatiales

Premier acteur français de la recherche aéronautique, spatiale et de défense, l'Office national d'études et recherches aérospatiales compte 2 000 salariés, dont 1 500 chercheurs, ingénieurs et techniciens, répartis sur huit sites en France. Le site de Toulouse est situé sur le complexe scientifique de Rangueil. Il représente un effectif de 420 personnes dont 280 ingénieurs et techniciens de recherche et 90 doctorants. Il accueille également chaque année une centaine de stagiaires en cours d'étude.

D. Calendrier

D1. Tâche 1 : Définition de l'étude

Il s'agit d'une tâche préalable dédiée à la réalisation d'un vaste état de l'art multidisciplinaire, à l'affinage de la méthode de travail et à l'identification d'expérimentations *in situ*.

1.1 – État de l'art sur les savoir-faire bioclimatiques pour la conception urbaine et architecturale

Objectif : Réaliser un état de l'art multidisciplinaire

Responsable de la tâche : LRA

Participants : Tous

Le projet IFU débutera par une phase d'état de l'art pluridisciplinaire qui sera réalisé à partir de différentes disciplines de la mécanique (principalement : thermique, aérodynamique, génie civil, climatologie), de l'architecture et de l'urbanisme, de l'écologie, etc. Il prendra en compte la pluralité des critères qui renvoient à la diversité des acceptions possibles de la notion d'« adaptation climatique » de nos habitats, que nous interrogerons au delà des représentations techniques dans le domaine de l'architecture et de l'aménagement.

Livrables Bibliographie thématique commentée.

T0 à + 6 mois

1.2 – Affinage de la méthode de travail

Objectif : Préciser la méthodologie générale du projet et les protocoles de synthèse et de validation par une réflexion interdisciplinaire

Responsable de la tâche : LRA

Participants : Tous

Cette tâche consiste à approfondir l'acculturation interdisciplinaire au sein de l'équipe afin de faciliter la compréhension mutuelle et le bon déroulement du projet. Pour cela, nous proposons d'organiser au cours d'un premier semestre différentes réunions dont trois moments forts :

- une journée d'étude qui se déroulera de la manière suivante. La matinée sera dédiée aux échanges sur les paradigmes et les méthodes scientifiques propres à chaque discipline dans le champ du projet, ainsi qu'à la mise en discussion de projets interdisciplinaires auxquels les partenaires ont participé. L'après-midi sera consacrée à la mutualisation des connaissances des partenaires sur la relation entre la conception urbaine et architecturale et les savoir-faire bioclimatiques.
- une journée de travail collectif visant à faire le point, entre tous les partenaires, des différents dispositifs urbains et architecturaux qui pourraient être insérés de manière pragmatique et réaliste dans le contexte de la Zac Montaudran Aerospace.
- un séminaire collectif marquera le lancement officiel du projet IFU. Il visera à affiner, à l'issue de ce parcours d'acculturation, l'organisation de la méthodologie générale du projet et permettra de converger vers un protocole de recherche consolidé. Cela concernera la formulation préalable de savoir-faire bioclimatiques et énergétiques réalistes dans le contexte du projet urbain de la Zac Montaudran Aerospace (tâche 2) et les protocoles de d'expérimentations (tâche 3) puis d'interprétation interdisciplinaire des atouts et limites de ces savoir-faire (tâche 4).

Livrables Compte rendu du séminaire de lancement du projet avec méthodologie précisée

+1 mois, +3 mois et +6 mois

D2. Tâche 2 : Formulation préalable de stratégies bioclimatiques

La tâche 2 consiste à établir un ensemble limité de savoir-faire dédiés à orienter efficacement la pertinence des choix bioclimatiques et énergétiques au démarrage de la conception des projets urbains et architecturaux.

2.1 – Proposition d'une méthode transversale

Objectif : Mettre à jour des stratégies globales de la qualité bioclimatique d'un projet urbain dans un contexte climatique alliant saisons froides et saisons chaudes.

Responsable de la tâche : LRA

Participants : Tous

Il s'agira de synthétiser globalement une méthode transversale sur les aspects bioclimatiques d'un projet et compréhensible par tout concepteur qui s'investit dans un projet urbain dans un contexte climatique comme celui de Toulouse, avec des périodes froides l'hiver et des périodes chaudes à très chaudes l'été et parfois dès la mi-saison.

Ce travail de synthèse se réalisera sous la forme de propositions et de critiques d'experts habitués des démarches bioclimatiques et énergétiques exigeantes dans les projets urbains et architecturaux. Par ailleurs, des questionnements énergétiques propres aux échelles urbaines seront adjointes : cohérence des transports, du traitement des eaux usées, des déchets, des circuits des biens de consommation courante.

Livrables	Maquette d'un système de questionnements et leurs exigences dédiés au démarrage de l'esquisse	+0 mois à +4 mois
------------------	---	-------------------

2.2 – Définition de savoir-faire ciblés

Objectif : Identifier des dispositifs urbains et architecturaux

Responsable de la tâche : LRA

Participants : Tous

Pour l'ensemble des questionnements de la méthode transversale, il s'agira d'identifier l'ensemble des dispositifs bioclimatiques urbains (sols, végétations, bâti...) qui permettent d'aiguiller efficacement les choix des concepteurs. L'un des aspects innovants du projet IFU sera d'établir un ensemble cohérent de savoir-faire rapides à prendre en main, relativement simples, et qui informent à une phase de la conception où les choix essentiels à la qualité urbaine, paysagère et architecturale (tels l'implantation, la morphologie, la matérialité, la spatialité) ne sont pas arrêtés et sont susceptibles d'évoluer, voire d'être remis en cause.

Livrables	Document décrivant la validation de chaque dispositifs et le couplage des uns aux autres.	+2 mois à +6 mois
------------------	---	-------------------

D3. Tâche 3 : Étude du micro-climat de la Zac Montaudran Aerospace

Cette tâche est dédiée à l'étude des phénomènes micro-climatiques dans la Zac de Montaudran Aerospace à partir de campagnes de mesures spectrales aéroportées puis de simulations des bilans radiatifs au cours de journées caractéristiques des périodes chaudes.

3.1 – Étude de mesures spectrales aéroportées

Objectif : Identifier les échanges radiatifs sur des campagnes déjà réalisée

Responsable de la tâche : ONERA

Participants : Tous

L'ONERA dispose de différentes campagnes de mesures aéroportées de la Zac Montaudran Aerospace et des zones avoisinantes couplées aux données météorologiques. Il s'agira de caractériser au mieux le comportement dynamique de différents dispositifs urbains identifiables lors de ces mesures.

Livrables Rapport de synthèse et répertoire des données existantes. +5 mois à +6 mois

3.2 – Mise en place de mesures aéroportées complétées par des mesures *in situ*

Objectif : compléter les mesures existantes (de la sous-tâche 3.1)

Responsable de la tâche : ONERA

Participants : Tous

En complément aux mesures spectrales aéroportées déjà existantes, il s'agira soit par de nouvelles mesures aéroportées, soit par des mesures effectuées au sol dans la Zac Montaudran Aerospace, de valider ou compléter l'efficacité de différents dispositifs urbains identifiés au cours de la tâche 2.

Livrables Rapport de synthèse et répertoire des mesures effectuées. +6 mois à +9 mois

3.3 – Simulation dynamique des phénomènes thermiques à l'échelle du quartier jusqu'au bâti

Objectif : comprendre le comportement thermique dynamique de dispositifs bioclimatiques urbains en période chaude

Responsable de la tâche : ONERA

Participants : Tous

Sur la base des données des sous-tâches 3.1 et 3.2, il s'agira d'effectuer des simulations thermiques dynamiques afin de valider ou mieux comprendre les échanges effectués par différents dispositifs urbains et architecturaux (au niveau de l'enveloppe du bâti). La méthode utilisée se basera sur un développement effectué récemment à l'ONERA qui couple le logiciel SOLENE à la simulation de phénomènes thermo-aérauliques.

Livrables Rapport de synthèse et répertoire des simulations effectuées. +7 mois à +11 mois

D4. Tâche 4 : Etude thermique dynamique de bâtiments

4.1 – Étude des conditions d'entrées à l'extérieur de l'enveloppe des bâtiments

Objectif : Définir les conditions micro-climatiques au niveau des ouvertures des bâtiments

Responsable de la tâche : LMDC

Participants : Tous

Sur la base des travaux de la tâche 3, il s'agira d'étudier tout particulièrement des phénomènes micro-climatiques autour de l'enveloppe du bâti et d'identifier les meilleures stratégies de rafraîchissement de l'air susceptible d'entrer dans les habitats. Le recours à un code CFD de type Fluent pourrait s'avérer nécessaire afin de valider ou mieux comprendre la nature de certains phénomènes aérauliques.

Livrables Rapport de synthèse.

+9 mois à +12 mois

4.2 – Simulation thermique dynamique d'habitats caractéristiques

Objectif : Comprendre le comportement thermique en période chaudes d'habitats

Responsable de la tâche : LMDC

Participants : Tous

Il s'agira de coupler les résultats de la tâche 3 et de la sous-tâche 4.1 par de nombreuses simulations thermiques dynamiques (STD) qui permettront de mieux comprendre différentes stratégies bioclimatiques à l'échelle du bâti (protection solaire des ouvertures, rôles de l'inertie thermique, rôles des modes de ventilation...). Selon la nature des phénomènes étudiés, les simulations seront réalisées à partir du logiciel TRNSys et, lorsque possible, avec le logiciel COMFIE-PLEIADES.

Livrables Rapport de synthèse et répertoire des résultats
des simulations thermiques dynamiques.

+10 mois à +15 mois

D5. Tâche 5 : Interprétation interdisciplinaire des savoir-faire

Comme suite aux expérimentations des tâches 3 et 4, une critique interdisciplinaire des différents dispositifs urbains et architecturaux sera menée dans le but d'établir les atouts et limites des différentes stratégies bioclimatiques dans le contexte de la Zac Montaudran Aerospace.

5.1 – Analyse multicritères

Objectif : Agréger l'efficacité et le caractère réaliste de différentes stratégies bioclimatiques.

Responsable de la tâche : LRA

Participants : Tous

Il s'agira d'agréger différents critères caractéristiques des dispositifs bioclimatiques étudiés à l'échelle urbaine (tâche 3) et à l'échelle architecturale (tâche 4). Nous espérons ainsi échafauder un outil simple et synthétique qui permettra de comparer différentes stratégies urbaines et architecturales de conception bioclimatiques, en intégrant la combinaison des différents dispositifs depuis l'échelle des espaces publics jusqu'à celle de l'intérieur des bâtiments.

Livrables	Rapport de synthèse et proposition de savoir-faire innovants pour le rafraîchissement	+12 mois à +18 mois
------------------	---	---------------------

5.2 – Ajustement interprétatif et interdisciplinaire du projet IFU

Objectif : Évaluer les retombées opérationnelles et les perspectives du projet IFU

Responsable de la tâche : IDV(PRES)

Participants : Tous

Cette tâche vise à construire une critique sur les conséquences économiques et sociales, aux échelles architecturales et urbaines, des conséquences des savoir-faire climatiques et énergétiques proposés dans le cadre du projet IFU. Une journée de restitution des études sera organisée avec une matinée dédiée aux critiques propres à chaque discipline (physique, ingénierie, urbanisme-architecture) puis une après-midi consacrée à une mutualisation des critiques et les perspectives d'évolutions du projet IFU.

Livrables	Compte rendu de la journée de restitution des études.	+16 mois à +18 mois
------------------	---	---------------------

D6. Tâche 6 : Pilotage et valorisation du projet

Objectif : Piloter le projet pour atteindre efficacement les objectifs définis

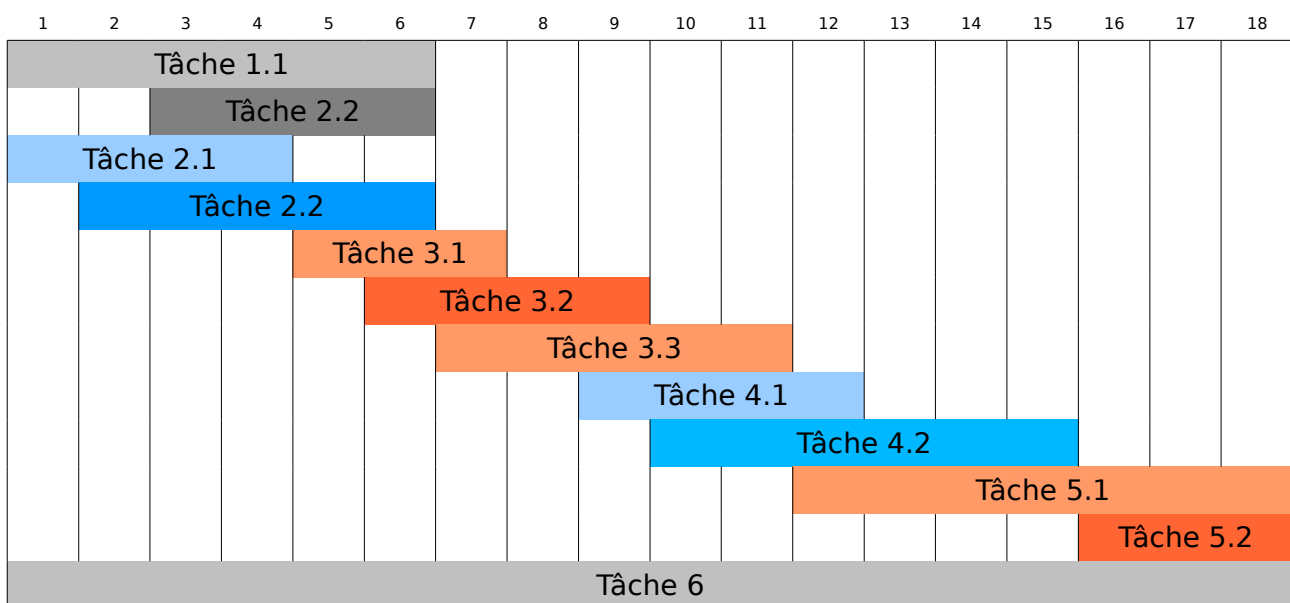
Responsable de la tâche : LRA

Participants : Tous

Le pilotage, tout au long du projet, a pour objectif de maîtriser la réalisation du projet, aussi bien au niveau individuel que global. Nous suivrons tout particulièrement les jalons du projet, ainsi que les livrables, en nous assurant du lien et de la cohérence entre les différentes tâches. La communication entre les partenaires sera maintenue grâce aux réunions régulières et, à la sortie du projet, la réalisation d'un ouvrage (électronique ou papier) dédié à l'enseignement et à la formation continue.

Livrables Compte-rendu des réunions d'avancement et
 ouvrage didactique dédié à l'enseignement

sur 18 mois



Phasage sur 18 mois des différentes tâches du projet IFU

sous la forme d'un diagramme de Gantt avec, en abscisse, les unités de temps en mois.