

Présentation des axes thématiques prioritaires

Axe 1 : Recherche translationnelle (de la molécule à la population) : oncérologie, vieillissement et pathologies dégénératives, chroniques ou inflammatoires

La structuration de la recherche et du soin en matière de vieillissement et de pathologies cancéreuses via le regroupement et la coordination des forces au sein d'un Gérontopôle et d'un Oncopôle sont un atout majeur pour la **recherche translationnelle** à l'Université de Toulouse III – Paul Sabatier. Par un effet d'entraînement, la recherche translationnelle appliquée aux pathologies cardiovasculaires, inflammatoires et plus largement chroniques, se développe au meilleur niveau sur le site (voir Axe 2). Cette recherche est, par nécessité, une recherche interdisciplinaire qui vise à valider des thérapies innovantes ; elle nécessite des moyens importants à moyen et long terme, et les équipes toulousaines impliquées sont déjà soutenues à haut niveau dans le cadre du Programme Investissements d'Avenir ou encore par le programme européen IMI.

La recherche translationnelle s'étend à la santé publique, et repose alors sur l'analyse des données d'études cohortes ou d'études interventionnelles, internationales et portant sur des centaines ou milliers de sujets et des centaines de variables, et impliquant ici encore une recherche collaborative interdisciplinaire pour la fouille, l'analyse et l'interprétation des données, domaines où la recherche à l'UPS dispose de forces considérables. En matière de recherche en santé publique, des équipes de l'UPS apportent également leur expertise en Science Humaines et Sociales, au travers d'études analysant la **Construction et la mise en œuvre des politiques de santé publique** et appliquées par exemple à la question de la transformation du style de vie dans les cas des patients atteints de cancer ou de pathologies chroniques invalidantes, ou encore à **l'Etude des modes d'organisation et d'intervention des dispositifs et des équipes de santé** dans une perspective d'optimisation du dispositif de santé.

Sous-axes :

- Recherche translationnelle
- Analyse de la construction et de la mise en œuvre des politiques de santé publique
- Etude des modes d'organisation et d'intervention des dispositifs et des équipes de santé

Axe 2 : Coévolution Humains – environnements

L'UPS joue un rôle leader dans l'étude de la **variabilité humaine et de ses déterminants**, notamment dans la mise en évidence des facteurs contrôlant la dynamique de la biodiversité à différentes échelles spatiales et temporelles (saison, siècle), dans l'étude de l'impact des changements et stress environnementaux sur les communautés animales, végétales et microbiennes et leurs conséquences pour l'Homme. Des équipes mènent des recherches importantes en écotoxicologie, sur les effets de l'érosion de la biodiversité sur les cycles biogéochimiques, les processus fonctionnels et les services rendus par les écosystèmes aux sociétés, et enfin sur la remédiation écologique de milieux fortement dégradés. En milieu océanique, un point fort concerne les interactions entre dynamique physique, productivité primaire et structure et fonctionnement des écosystèmes marins, avec un focus sur les zones d'upwelling dans le contexte du changement global.

Si l'évolution humaine est influencée par l'environnement, l'activité humaine, en retour, affecte **l'environnement et la santé** humaine. Des équipes de l'UPS étudient ces interactions bidirectionnelles qui renvoient à l'évolution humaine sur le temps long, à la variabilité sur le moyen terme (acclimatation, adaptation), à la pathologie et à la médecine évolutive et prédictive sur le temps court. Cette variabilité est abordée notamment par l'étude des relations phénotype/génotype/épigénome/environnement qui sont un enjeu majeur de société, tant dans le domaine de l'identification que pour celui de la santé ou des relations entre la biologie et les sciences humaines et sociales. En matière d'effets de l'environnement et des changements de mode de vie sur la santé, de nombreuses équipes, dont beaucoup récemment installées sur divers sites toulousains, mènent des travaux de pointe sur la réponse inflammatoire adaptative et la réponse infectieuse, allant de l'étude des mécanismes physiopathologiques à la recherche en santé publique, dans les pathologies infectieuses, cardiovasculaires ou métaboliques.

Un des domaines de recherche où Toulouse fait montre d'originalité est celui de l'approche transdisciplinaire des **systèmes intelligents, naturels ou artificiels**. Il existe en effet des interactions de longue date entre des laboratoires de biologie/médecine et des laboratoires de sciences dures ou de sciences de l'ingénieur. Ces collaborations ont permis par exemple le développement de systèmes de traitement du signal bio-inspirés ou de systèmes de suppléance perceptivo-motrice.

Une autre originalité de la recherche toulousaine est de s'appuyer sur les Sciences Humaines et Sociales pour concevoir des systèmes intelligents mieux adaptés à l'Homme. Ici, l'apport des SHS permet d'introduire **l'analyse des réseaux sociaux et des processus sociaux** pour améliorer l'efficacité et l'acceptabilité des systèmes artificiels dans la collecte, l'analyse, la circulation et l'usage des données numériques qu'ils produisent.

Sous-axes :

- Variabilité humaine et ses déterminants
- Environnement et santé : pathologies chroniques inflammatoires, infectieuses et toxiques
- Systèmes intelligents naturels et artificiels ; analyse des réseaux sociaux et des réseaux complexes d'entités en interaction et en évolution

Axe 3 : Interactions biotiques et abiotiques ; biologie intégrative, organismes modèles et analyses multi-échelles

La communauté toulousaine est reconnue pour ses études sur les interactions biotiques comme processus central des changements d'échelle depuis les approches infra-individuelles (gène-développement-réponse à l'environnement) jusqu'aux approches supra-individuelles (populations-communautés-écosystèmes). Les thématiques abordées en matière de **Biologie et écologie des systèmes** sont variées : réseau de gènes et hérédité non génétique, agrobiosciences, effets de l'environnement biotique et abiotique, dynamiques des interactions biotiques et modélisation pour la prédiction de la dynamique éco-évolutive des systèmes naturels.

Les recherches en **Biologie structurale** menées par les laboratoires de l'UPS portent sur des molécules isolées, dont la structure est résolue à l'échelle de quelques Angström, et sur des cellules dont l'organisation ultrastructurale peut être décrite avec une résolution de quelques nanomètres. De nouveaux modes de microscopie électronique en 3 dimensions et des techniques d'imagerie photonique dépassant la barrière de la diffraction, disponibles sur le site, offrent des modes de visualisation du vivant à l'échelle moléculaire. Par ailleurs, les techniques biophysiques comme la résonance magnétique nucléaire du solide permettent d'appréhender la structure de macromolécules dans leur environnement cellulaire. Il est désormais possible d'envisager de franchir les barrières entre les échelles d'étude et d'établir une cartographie des macromolécules dans leur contexte intracellulaire. Ces approches structurales intégratives ouvrent des perspectives inédites pour la description de l'organisation du vivant et pour le développement de nouvelles approches pharmacologiques.

La spécialisation fonctionnelle des cellules comme la réponse des organismes aux changements de leur environnement fait largement intervenir des modifications dans l'expression des génomes, dont certaines peuvent être transmissibles (modifications épigénétiques). Historiquement, les mécanismes de cette **Biologie des génomes** ont été abordés par l'étude de la régulation et de la fonction de gènes spécifiques. Le développement récent des techniques de séquençage à haut débit permet d'appréhender la régulation, l'expression, la structure, la stabilité et l'évolution des génomes de manière globale et révèlent des fonctions nouvelles des génomes, par exemple à travers la mise en évidence de nouveaux ARN. Ces approches génomiques nécessitent le développement de méthodologies d'analyse statistique spécifiques et de modélisation mathématiques des réseaux de gènes. Par ailleurs, elles doivent recourir à des techniques d'imagerie intégrant des marqueurs génétiques permettant de visualiser à l'échelle de la molécule unique les mouvements intracellulaires de gènes ou de chromosomes. De telles recherches transdisciplinaires ne peuvent être menées que dans le cadre d'une université pluridisciplinaire comme l'Université Paul Sabatier. Elles permettent d'établir une vision intégrée de la dynamique des génomes et de sa position dans le fonctionnement des systèmes biologiques.

Sous-axes :

- Biologie et écologie des systèmes
- Biologie structurale
- Biologie des génomes

Axe 4 : Molécules, matériaux, dispositifs et procédés pour la santé, le vivant et l'environnement

Les recherches dans cet axe associent des aspects fondamentaux (physico-chimiques, mécaniques, biologiques, de sciences de l'information et des systèmes) et de forts enjeux applicatifs et sociétaux. L'intérêt scientifique de ces recherches est d'associer aux approches biologiques, biochimiques et microbiologiques une étude de type ingénierie afin de prendre en compte dans les processus étudiés les rôles multiples et multi-échelles des interactions (système vivant-matériau, système vivant-environnement etc.) et des transferts (énergie mécanique, transfert thermique et matière) sur l'évolution de ces milieux complexes. Elles ont une forte visibilité internationale. Elles se déclinent sur les thématiques suivantes.

A l'interface entre des laboratoires de chimie, de biologie, de médecine et de bio-ingénierie, les recherches sur les **Molécules pour la thérapie, le diagnostic et biomatériaux innovants** se développent autour de plusieurs thèmes : molécules sondes, molécules et macromolécules bioactives, vectorisation/relargage, ingénierie du vivant et mécanismes chimiques en biologie. Cette interface permet un continuum allant de la conception et de la modélisation de la molécule, macromolécule ou matériau innovant jusqu'aux tests biologiques et aux essais précliniques, le cas échéant en co-développement avec des partenaires industriels locaux. Tous les laboratoires concernés sont impliqués dans les deux pôles de compétitivité participant de cet axe de recherche et sont à l'origine de la constitution de plateformes labélisées au niveau national : Plateforme Intégrée de Criblage de Toulouse (PICT), plateforme de Protéomique, Métabolomique et Fluxomique, plateforme de Galénique Avancée (GALA).

Les recherches menées à l'UPS sur l'**ingénierie et microsystèmes pour la santé, le vivant et l'environnement**, connaissent un fort développement. Elles bénéficient au sein de la communauté toulousaine d'un continuum allant de l'analyse des processus élémentaires à la conception de dispositifs de production et de mesures *in situ* jusqu'à l'optimisation l'analyse et le traitement de données. L'UPS propose un environnement propice au développement de cette thématique (deux facultés de médecine, le Labex TOUCAN (Toulouse/Cancer), le pôle de compétitivité Cancer-Bio-Santé et un cluster). Cette recherche connaît un essor mondial, soutenu par des financements importants et des congrès dédiés.

Ces recherches se déclinent notamment dans le domaine de la **santé** : production de médicaments, aide au diagnostic médical et suivi thérapeutique, plasmas froids pour la décontamination et la chirurgie, microcirculation, mécanique de l'os et des articulations. Dans le domaine du **vivant**, les recherches portent sur les micro et nanotechnologies pour l'exploration du vivant, l'analyse moléculaire, et l'acquisition de données cliniques, le développement de laboratoires sur puce. Enfin dans le domaine de l'**environnement**, elles sont à la base de nombreuses innovations pour l'analyse, le traitement et la gestion de l'eau, la dépollution des sols (par plasmas notamment) et pour l'optimisation de la distribution d'intrants en agronomie, pour la valorisation de déchets et des sous-produits ainsi que pour la prévention des risques naturels et industriels.

Sous-axes :

- Molécules pour la thérapie, le diagnostic et biomatériaux innovants
- Ingénierie et microsystèmes pour la santé, le vivant et l'environnement

Axe 5 : Modélisation, simulation numérique, modèles de calcul, calcul intensif

La modélisation, la simulation numérique et le calcul intensif constituent aujourd'hui un enjeu stratégique pour la production de nouvelles connaissances scientifiques qui traverse de multiples champs disciplinaires de l'Université : mathématiques fondamentales et appliquées, sciences de la matière, sciences de la vie, sciences du Système Terre et de l'Univers, bio-informatique, sciences de l'ingénieur, traitement de l'image etc. La modélisation et la simulation numérique sont au cœur de la plupart des avancées de la recherche. Les enjeux ne sont pas seulement scientifiques mais aussi sociétaux, économiques, financiers et éthiques. Que que soit le domaine, maîtriser tous les aspects du calcul intensif requiert un travail par essence interdisciplinaire reposant sur la connaissance approfondie d'un domaine applicatif et sur un savoir-faire en modélisation, ainsi que le développement et l'exploitation de l'outil et des méthodes informatiques pour la simulation numérique. Sur le plan des ressources informatiques, le calcul repose sur plusieurs niveaux: les moyens des laboratoires et/ou des structures fédératives, les moyens du méso-centre régional CALMIP (actuellement le plus puissant des Tier 2), les moyens nationaux de Tier 1 (IDRIS, CINES, CCRT/TGCC) et les moyens européens dits de Tier 0 accessibles par le biais de l'infrastructure PRACE.

Aujourd'hui les phénomènes biologiques peuvent se regarder à plusieurs échelles complémentaires. Le niveau microscopique qui est celui des modèles aléatoires, et pour lequel se développent depuis quelques années des techniques de vérification et de diminution de la dimension de l'espace des variables (analyse de sensibilité par exemple). Les niveaux mésoscopiques et macroscopiques qui sont ceux de l'analyse physique et déterministe, et où entrent en jeu des modèles d'équations complexes pour lesquels les théoriciens et les moyens de calcul modernes apportent des réponses pertinentes mais souvent partielles. Un des aspects important concerne l'interaction entre la réflexion de fond sur la signification des phénomènes biologiques, leur modélisation et leur étude quantitative.

La thématique **Mathématiques et informatique pour la biologie et la santé**, dont le projet phare pour le prochain quinquennal est l'action MIBS (Modélisation et traitement de l'Information pour la Biologie des systèmes) se constitue actuellement autour d'un réseau informel et de plusieurs projets pluridisciplinaires. Ceci nous incite à adopter une action structurante transverse qui s'appuie sur des compétences internationalement reconnues, à l'institut de Mathématique de Toulouse (en modélisation, équations aux dérivées partielles, statistique, probabilités), à l'institut de Recherche en Informatique de Toulouse (en traitement numérique, programmation, infrastructures informatique et leur gestion), et l'ensemble des unités de recherche en SdV (*Centre de Biologie Intégrative, l'oncopôle, les Labex Tulipe et Toucan*). Cette action phare est reconnue comme prioritaire depuis l'opération plan campus de l'université Paul Sabatier.

Pour ce qui touche aux **sciences de la matière, de l'univers et du Système Terre, la modélisation, la simulation et le calcul intensif** sont nécessaires aux progrès des connaissances, progrès qui impliquent des développements théoriques et analytiques, des développements logiciels (codes d'audience internationale, spécifiques, généralistes, mais aussi multi-physiques et/ou multi-échelles), et des moyens de calcul adéquat. Les recherches des équipes toulousaines sont multiples, qui concernent la physique de la matière, la physique statistique, la chimie, l'interaction lumière-matière, la mécanique et la dynamique des fluides, le climat, la structure et la dynamique du globe (sismologie, ...), la simulation des milieux astrophysiques. Simulation et calcul sont l'une des trois thématiques transverses des labex NEXT et CIMI. L'Université Paul Sabatier abrite l'un des trois nœuds français du réseau européen CECAM (Centre Européen de Calcul Atomique et Moléculaire) ainsi qu'un réseau Erasmus Mundus de Chimie théorique (TCCM).

En plus des laboratoires majeurs au niveau national en terme de pratique de la simulation numérique et du calcul intensif (astrophysique, climat, matériaux, chimie, physique théorique, combustion, mécanique des fluides, procédés ...), l'université Paul Sabatier héberge l'institut de mathématique et l'institut d'informatique pour lesquels la modélisation et les **modèles de calcul** sont des thèmes très importants (infrastructures et systèmes, paradigmes de programmation, calculabilité, modèles et algorithmes) de même que les défis posés par la simulation numérique en raison de la complexité croissante des modèles (multi-physique, multi-échelle, quantification des incertitudes) alors que la gestion et la valorisation des données constituent l'objet même des recherches.

De nombreux **systèmes dynamiques**, c'est-à-dire dont l'état change au cours de leur évolution temporelle, se rencontrent aussi bien en sciences de la vie qu'en sciences humaines, sciences de l'ingénieur ou en sciences de la matière, et font l'objet d'intenses recherches expérimentales et théoriques. La compréhension et la prédiction de leur évolution reposent de plus en plus sur une modélisation faisant intervenir de nombreuses échelles, des fluctuations aléatoires, et des simulations numériques intensives. Approcher la réalité des phénomènes physiques comme biologiques nécessite l'introduction d'un grand nombre de variables d'entrée délivrant de nombreuses variables en sortie. Tant au niveau de l'analyse théorique, que de la modélisation et des codes de calcul, ces phénomènes de grande dimension sont un challenge scientifique, que l'on parle de Big Data, de données parcimonieuses, de systèmes complexes, de réseaux en interaction etc. Pour mesurer la variabilité des sorties et connaître l'influence des diverses variables d'entrée, il est nécessaire d'explorer l'espace des variables d'entrée. La dimension de l'espace des variables (allant de la dizaine à plusieurs centaines) rend un traitement exhaustif impossible, y compris actuellement au niveau calcul. Pour passer outre cette impossibilité, il faut définir des stratégies fondées sur une connaissance partielle des variables. L'utilisation de modèles stochastiques ou incertains permet de rendre compte des dépendances à divers niveaux de complexité et autorise la mise en œuvre de plans d'expériences. Ces modèles sont aussi bien adaptés à des études plus locales comme l'analyse de sensibilité et de la commande robuste.

Les **systèmes complexes** recouvrent un ensemble de thématiques liées à la dynamique chaotique, à la physique hors d'équilibre, à l'étude des réseaux et aux systèmes auto-organisés. Ces thèmes sont présents dans les LABEX CIMI et NEXT, et permettent des liens avec les autres composantes de l'Université de Toulouse (par exemple la Toulouse School of Economics à Toulouse I et la sociologie à Toulouse II).

Les **systèmes quantiques** représentent une forme importante de complexité dont la modélisation permet de comprendre de nouvelles formes d'organisation de la matière, en physique et en chimie fondamentales et appliquées comme en biologie. L'Université Paul Sabatier est un pôle reconnu dans ce domaine pour la physique et chimie, en particulier à travers le Labex Next et ses composantes théoriques.

Sous-axes :

- Modèles de calcul
- Mathématiques, Informatiques pour la Biologie et la Santé
- Simulation numérique et calcul intensifs en sciences de la matière et de l'univers
- Systèmes dynamiques, Systèmes complexes, Systèmes Quantiques

Axe 6 : Des masses de données à la connaissance dans la société, l'exploration spatiale, la biologie et la santé

Dans de multiples domaines, les grandes masses de données (le fameux « Big Data ») impactent tous les secteurs de la recherche, que ce soit dans le domaine de la biologie/santé ou dans celui des sciences de l'Univers et du Système Terre, l'avènement de systèmes d'observation de plus en plus complexes conduit à une inflation très forte des volumes de données accessibles à la recherche.

En sciences de la vie et de la santé, les progrès techniques réalisés en séquençage et en imagerie, la mise en œuvre de très large cohortes ou les études de population imposent donc d'améliorer le **stockage, l'archivage et la sécurisation temporelle des données**. Cet afflux de données massives combiné aux besoins d'analyse, de visualisation 3D/4D et de modélisation des systèmes biologiques nécessite des moyens de calcul puissants et la circulation d'informations pérennes dans le temps dévolues spécifiquement à ces fonctions. En SDV, la valorisation (exploitation et partage) des données, est liée à de véritables enjeux de société car la gestion, l'utilisation et le partage, de ces masses de données soulèveront des questions éthiques et juridiques

En Sciences de l'Univers et du système Terre, la variété de ces données et les volumes de plusieurs To acquis chaque jour et à archiver constituent de véritables défis à relever pour valoriser l'exploitation scientifique, notamment celle des grandes missions spatiales. Les progrès de l'exploitation des données spatiales sont un enjeu majeur car le développement du concept d'Observatoire Virtuel, qui permet de mettre en relation l'ensemble des données (spatiales et sol) publiques, calibrées et standardisées à l'échelle internationale, impose le développement d'outils de **codage, d'exploitation et de partage** adéquats. Cet effort considérable se justifie dans un contexte où les données, qu'elles proviennent de missions satellitaires ou d'observatoires terrestres, sont très rapidement publiques pour l'ensemble des communautés scientifiques concernées. En parallèle, le développement des simulations numériques, dans le domaine de l'astrophysique, de la physique stellaire, des changements climatiques et de la météorologie, génère aussi des volumes très importants de données à analyser et visualiser. Les problématiques générées se rejoignent dans les besoins d'archivage complexe, d'outils d'analyse, d'extraction et de visualisation performants.

Dans ces nouveaux ordres de grandeur, la capture, le stockage, la recherche, le partage, l'analyse et la visualisation des données doivent être redéfinis. Les perspectives de ces développements vont toucher de grands pans de la recherche académique et, au-delà, l'exploration de l'information aura un impact sociétal inéluctable, en particulier dans les domaines de la médecine ou de l'étude des changements climatiques et de ses conséquences. De nouvelles formes de **codage, d'exploitation et de partage de données** sont nécessaires pour de nouvelles découvertes.

La science des données qui englobe tous les aspects liés à la production de données ainsi qu'à l'extraction de connaissance à partir de données expérimentales, d'observation ou de simulation est bien évidemment devenue un enjeu stratégique. Elle englobe de multiples champs d'expertise : mathématiques ; statistique ; ingénierie sur les données ; reconnaissance de forme ; **apprentissage séquentiel ou apprentissage de règles de décision** via des techniques de classification ou régression supervisées, de clustering, des modèles parcimonieux en grande dimension ; visualisation ; modélisation dans l'incertain ; aide à la décision ; bases et entrepôts de données. Cette expertise inclut la maîtrise de tous les aspects du calcul en allant des infrastructures jusqu'au calcul haute performance.

Dans ces domaines, en plus du travail important d'ingénierie, les développements relèvent dans de nombreuses situations de l'expertise scientifique et de la recherche méthodologique pour lesquels l'UPS se situe à l'avant-garde au niveau national et international.

Sous-axes :

- Stockage, archivage, sécurisation temporelle
- Codage, exploitation et partage de données
- Apprentissage

Axe 7 : Atomes, molécules et nano-objets : du concept à l'expérience

Une des spécificités du site toulousain dans la manipulation de la matière est de disposer d'un spectre extrêmement large de compétence alliant à la fois une expertise poussée sur de nouveaux états de la matière et leur manipulation, une compétence historique reconnue et à la pointe internationale de la synthèse de composés chimiques, jusqu'à l'approche bottom-up d'édifices moléculaires plus importants et de nano-objets. Cette expertise d'élaboration qui permet d'aller jusqu'aux nanomatériaux et l'ensemble de leurs applications, s'accompagnent d'un fort volet de caractérisation et d'étude de la matière en interaction sous divers champs. Une partie de ces activités s'inscrit dans les orientations prioritaires de la région autour du spatial, de l'énergie et de la santé.

Les travaux sur les **Architectures Moléculaires et les Nanomatériaux**, notamment fonctionnels et adressable, à l'interface entre chimie, physique et biologie, connaissent un développement considérable sur le site. La proximité des nanotechnologies et de la théorie conduit certains à développer une démarche dite "*de la molécule au dispositif*" tandis que d'autres proposent de nouvelles méthodes d'élaboration de nano-composés inorganiques, de mise en forme (massifs, couches minces, nanostructures...) et étudient les relations structure-microstructure-propriétés spécifiques des nanomatériaux. Le magnétisme et la physique des systèmes quantiques étendus, en particulier dans les matériaux à forte corrélation, sont également une des forces du site. Ils concernent à la fois des études expérimentales de pointe, en physique du solide, nanoparticules et gaz quantiques froids, et des études théoriques caractérisant de nouveaux états de la matière, en particulier dans les systèmes en interaction.

Les **Nanotechnologies** constituent également un axe important de notre site. Elles se développent selon une démarche pluridisciplinaire et visent à exploiter les propriétés fonctionnelles des matériaux inorganiques, organiques ou biologiques structurés à l'échelle nanométrique au sein de dispositifs et systèmes complexes hautement miniaturisés. Les travaux, portés à niveau international, incluent, outre la mise en œuvre d'approches top-down, l'étude des mécanismes de structuration par nano-assemblage ou par association, à la nano-échelle, de matériaux de type biotique/abiotique, organique/inorganique... (nanotechnologies hybrides). Ces technologies sont déployées en direction des enjeux scientifiques, sociétaux et économiques majeurs sur des aspects fonctionnels variés : biodétection ultime, communication hyperfréquences, photonique, laboratoires sur puce. Ces travaux nécessitent de contrôler les interactions physiques, chimiques ou biologiques à la nano-échelle et leur impact sur la dynamique des processus qui prennent place dans ces nanosystèmes. Notons enfin que le site toulousain bénéficie, dans ce domaine, de la présence d'une des 5 centrales nationales de micro et nanofabrication.

Les **Nanocarbones** (nanotubes, graphène, nanocornes, noirs de carbone, fullerènes, ...) sont les nanomatériaux les plus étudiés dans le monde car ils sont capables de propriétés extrêmes ou uniques et peuvent prétendre à de très nombreuses applications, souvent en rupture avec les solutions technologiques existantes. Le campus toulousain est probablement le site universitaire le plus impliqué de France, sa force dans le domaine venant de ce qu'il intervient à chaque niveau de la chaîne qui préside en science des matériaux (synthèse - caractérisation - propriétés et mécanismes - dispositifs démonstrateurs - valorisation - impacts environnementaux et sociétaux) avec pour chacun une reconnaissance internationale.

Dans la lignée des travaux initiés par Paul Sabatier, Toulouse a toujours été une place forte en **Chimie des hetero-éléments et des métaux de transition**: liaisons non-usuelles, nouveaux modes d'activation et catalyse. Cette expertise, internationalement reconnue, a permis d'obtenir des résultats remarquables notamment dans l'étude d'espèces hautement réactives, ou de nouveaux modes de liaisons, et le développement de nouveaux systèmes catalytiques pour des applications en catalyse en solution ou supportée. Outre des études fondamentales destinées à la compréhension des mécanismes réactionnels, les équipes impliquées développent en collaboration avec de nombreux industriels des systèmes destinés à des applications plus pratiques telles que la synthèse de composés à haute valeur ajoutée.

Les recherches autour de **l'Interaction Rayonnement-Matière** s'articulent autour de deux directions fortes : sonder les propriétés des objets (atomes, molécules, nano-objets) par la lumière, et manipuler les objets par la lumière ou la lumière par les objets. Le site se distingue par une forte expertise sur les aspects fondamentaux et de nombreux développements appliqués (par exemple en photophysique et photochimie), accompagnée d'une importante synergie entre expérimentateurs et théoriciens. Dans ce domaine, une démarche interdisciplinaire originale associant astrophysiciens spécialistes de l'observation

des poussières cosmiques, notamment dans les environnements stellaires, physiciens des plasmas et chimistes quantiques a été mise place à l'UPS pour observer, modéliser et comprendre les processus fondamentaux, de nature électrochimique (ions, électrons et radicaux) à l'origine de la nucléation, la croissance et l'altération de nanoparticules et des grains de poussière cosmique dans des réacteurs à plasma artificiels ou naturels. Cette démarche, qui combine observations astrophysiques dédiées, développements technologiques sur les récepteurs millimétriques, observations et expériences de laboratoire innovantes (chambre de simulation astrochimique PIRENEA, décharges micro-onde, spectromètres IR et moyens de caractérisation des poussières – XPS, EDX, microscopes électroniques) et travaux de modélisation ad-hoc bénéficie de nombreux soutiens régionaux comme internationaux.

Sous-axes :

- Architectures moléculaires, nanomatériaux, nanotechnologies et ingénierie des nano-systèmes
- Nanocarbones
- Chimie des hétéro-éléments et des métaux de transition : liaisons non-usuelles, nouveaux modes d'activation et catalyse
- Interaction rayonnement-matière : du fondamental à l'appliqué

Axe 8 : Système Terre, planètes et étoiles : observation et mécanismes

L'UPS abrite l'un des plus forts potentiels de recherche en France dans ce domaine avec un réseau de laboratoires couvrant un vaste champ de recherche allant du Big Bang à l'environnement terrestre. Ces activités reposent sur une recherche fortement pluridisciplinaire, sur des innovations théoriques, instrumentales, analytiques et méthodologiques et sur des Services d'Observation inscrits dans des programmes et réseaux nationaux, européens et internationaux. L'astronomie connaît une dynamique de découvertes passionnantes, fournissant des réponses à des questions fondamentales que nous nous posons depuis des siècles. Les équipes de l'UPS sont au front de la recherche internationale sur des questions comme la nature de l'énergie noire, les scénarios de formation et d'évolution des galaxies, les phénomènes violents autour des trous noirs, qui font appel à une physique extrême ayant des implications profondes sur la compréhension de l'accélération des particules ou l'origine du rayonnement cosmique. L'UPS est aussi à la pointe des études sur la **formation des étoiles et des systèmes planétaires** et sur les phénomènes magnétiques dans les étoiles, abordés via la spectro-polarimétrie en plein essor, et par des approches théoriques et de modélisation de l'hydrodynamique des étoiles. L'évolution physico-chimique des gaz et poussières constituant la matière interstellaire est étudiée par des approches interdisciplinaires originales couplant travaux de laboratoire, observations spatiales et modélisation. L'exploration de notre système solaire constitue un autre domaine d'excellence de la recherche à l'UPS. Le point fort de ces travaux est la conception et réalisation de mesures à la surface et/ou autour de planètes (Mars, Saturne, Mercure, Jupiter) et leurs satellites (la Lune, Titan), fournissant des données qui ont grandement contribué à notre compréhension de la dynamique des ionosphères planétaires et des plasmas spatiaux, ainsi que celle de l'histoire, de la structure interne et des caractéristiques des surfaces des planètes telluriques et des petits corps. Enfin, la recherche et l'étude des exo-planètes constituent un axe fort de développement pour les années à venir.

Les approches géophysiques (sismologie, géodésie et gravimétrie), les études de terrain, les approches pétrologiques, géochimiques et géochronologiques modernes et la simulation numérique permettent d'aborder de manière nouvelle les questions de **structure et dynamique internes de la Terre**, de déformations actives et de risques, de géodynamique des chaînes de montagne, de formation et d'évolution des magmas, ainsi que la métallogénie et l'exploration des ressources métalliques et des gemmes, l'exploration pétrolière et la fracturation des réservoirs, l'hydrogène naturel... Par des approches théoriques, expérimentales, analytiques et numériques novatrices, l'UPS occupe aussi une place de leader dans l'étude des mécanismes de réaction entre phases solides et entre fluides, minéraux et organismes vivants pour aborder l'hydrothermalisme, la diagénèse et l'altération des roches, le stockage de CO₂ ou de déchets nucléaires, ainsi que la caractérisation et la synthèse de géo-matériaux utilisés dans les matériaux composites. Des approches originales sont aussi développées pour l'étude de l'évolution des reliefs et de celle du climat pour plusieurs époques-clés de l'histoire de la Terre.

Dans un contexte de changement global et d'anthropisation accélérée des milieux, les recherches sur le fonctionnement des enveloppes externes de notre planète et de leurs interfaces, sur l'évolution du climat et des ressources constituent un enjeu majeur. Dans ce domaine, l'UPS est en pointe dans la définition de missions spatiales d'observation de la Terre, leur validation et leurs utilisations, en mode recherche et pré-opérationnel, pour caractériser l'océan, l'atmosphère, la cryo-sphère, les surfaces et l'hydrosphère continentales et la biosphère, ainsi que pour comprendre et quantifier les flux d'énergie et de matière aux interfaces entre les différents milieux. Ces approches satellitaires sont couplées aux études in situ des processus physiques et (bio) chimiques et des bilans, menées pour différentes échelles d'espace et de temps à partir de Services d'Observation pérennes et de campagnes dédiées. Les équipes de l'UPS jouent un rôle leader pour l'étude des processus (thermo)dynamiques et microphysiques gouvernant l'atmosphère météorologique, de la physico-chimie de la troposphère et de la basse stratosphère, du transport, de l'évolution et de l'impact d'espèces chimiques gazeuses et particulaires, des circulations océaniques et leurs relations avec le climat, des transferts de matière et des masses d'eau dans l'océan, de la dynamique littorale, de l'évolution du trait de côte, des transferts continent-océan et des échanges entre domaine côtier et océan ouvert et des systèmes glaciaires. La zone critique et hydrologie *sensu lato* constitue un autre champ d'excellence avec des études, en milieux naturels et anthropisés, sur le cycle de l'eau, les bilans hydriques et les ressources en eau, les relations pluies-débits, les crues rapides, l'humidité des sols, les couplages hydrologie-géochimie, l'irrigation, les transferts en milieux géologiques

hétérogènes ou fracturés, les transferts et bilans aux interfaces (énergie, altération-érosion, gaz à effet de serre), ainsi que le devenir des éléments biogènes et des polluants dans l'environnement. Les observations satellitaires et in situ et les études de processus sont intégrées par le développement d'outils de simulation numérique et d'assimilation des données et de techniques innovantes de transferts d'échelle qui constituent un autre domaine d'excellence des équipes de l'UPS travaillant sur notre environnement.

Sous-axes :

- Du Big Bang aux systèmes planétaires
- Terre interne
- Enveloppes externes, zone critique et environnement

Axe 9 : Matériaux, procédés et structures pour l'aéronautique et le spatial

La thématique des **traitements de surface et des revêtements pour l'aéronautique et le spatial** est au centre du triangle régional « recherche, innovation, transfert ». Elle recouvre les aspects de conception, formulation et fonctionnalisation à partir de précurseurs en voie liquide et la mise en œuvre de procédés originaux (électrophorèse dans des sols colloïdaux, OAS fine, micro-arcs, dépôt en milieu liquide ionique, couplage électro-déposition/voie sol-gel...). Cette thématique abonde le ressourcement scientifique de l'IRT Saint-Exupéry.

Relier le comportement des matériaux structuraux, métalliques et composites base polymère, aux mécanismes intimes qui régissent leurs propriétés mécaniques est un enjeu stratégique, tout particulièrement pour l'aéronautique (avions et moteurs) et l'espace (lanceurs et satellites). La mise au point de procédés innovants de fabrication de pièces est également incontournable. L'Université Paul Sabatier a dans le domaine des **Matériaux de Structure pour l'Aéronautique et le Spatial** un potentiel de recherche reconnu et crucial pour le ressourcement scientifique des donneurs d'ordres mondiaux présents en Région Midi-Pyrénées. Cet Axe stratégique recouvre notamment 3 projets de l'IRT Saint-Exupéry.

L'aéronef du futur sera de plus en plus souple, sa consommation spécifique de plus en plus faible. Dans ce contexte, la recherche et le développement en **Mécanique des fluides et énergétique** est indispensable à l'optimisation des structures et des propulseurs pour tenir compte notamment des contraintes mécaniques et thermiques. Le contrôle et la réduction du bruit émis par les avions sont également un enjeu majeur.

Le **design et la modélisation de surfaces non standard** (plumes d'oiseaux, écailles de poissons, surfaces déformables, poreuses, réactives) sont également au cœur du développement des nouveaux aéronefs. Ces surfaces trouvent en effet des applications dans la réduction de traînée, les économies d'énergie, les surfaces superhydrophobes et autonettoyantes (pare-brises), les surfaces adhésives.

Enfin, la prise en compte des contraintes thermiques est devenue un enjeu majeur, notamment pour « l'avion tout électrique » et les satellites de télécommunications dont les performances ne cessent d'augmenter. Il devient crucial de dissiper des puissances thermiques localisées importantes.

Sous -axes :

- Traitements de Surface et Revêtements pour l'Aéronautique et le Spatial
- Matériaux de Structure pour l'Aéronautique et le Spatial
- Mécanique des Fluides et Énergétique pour l'Aéronautique et le Spatial

Axe 10 : Systèmes embarqués intelligents : vers les systèmes cyberphysique

Les compétences développées depuis de longues années à l'Université Paul Sabatier sur la problématique des systèmes embarqués, en particulier dans les domaines de l'aérospatial et des transports, lui permettent de relever les défis posés par l'évolution de ces systèmes : profusion et omniprésence envahissant l'environnement physique en interaction avec les humains. On parle souvent de systèmes cyberphysiques pour caractériser ce paradigme et les tendances associées.

Il s'agit d'une large diffusion de nœuds «intelligents» de plus en plus intégrés et miniaturisés (y compris à l'échelle micro et nanométrique pour certains) offrant tout ou partie des capacités avancées suivantes : collecte de données diverses (capteurs), communication (ouverture et interaction), traitement des informations (analyse, prise de décision), et action sur l'environnement (actuateurs). Ces capacités sous-tendent pleinement les notions d'intelligence ambiante et d'Internet des objets.

Une autre caractéristique associée à ces capacités d'interaction entre eux ou avec l'environnement physique de tels systèmes dynamiques complexes concerne leurs interactions avec les humains : bien au-delà des acteurs classiques (par ex. les opérateurs dédiés à la conduite et à la surveillance de tels systèmes), ces interactions concernent de plus en plus le grand public et une large partie de la société. On peut notamment citer : les futurs systèmes de transport intelligents et autonomes (avionique, automobile), les vols spatiaux (constellations de satellites, rendez-vous orbitaux, stations spatiales, missions interplanétaires), les nouvelles tendances de la « *silver economy* » (émergence de la notion d'EHPAD à domicile pour la surveillance et l'assistance aux personnes âgées ou handicapées) et du suivi médical des patients — y compris hors hôpital — (analyse et soin), l'opération et le contrôle des infrastructures (réseaux électriques, de transport, de communication, ...). Par ailleurs, la mise en œuvre d'une agriculture raisonnée (contrôle et maîtrise effectifs des intrants et effluents), l'élaboration d'informations à valeur ajoutée pour des services dédiés (espaces publics et ville numérique), atelier/cockpit du futur (nouvelle génération de robots autonomes communicant/assistant contrôlant les humains dans leurs tâches, fonctions de pilotage) ou encore les opérations de sauvetage ou de gestion de crise comme le déploiement de flottes de robots aériens et terrestres en connexion avec des acteurs humains.

Ces quelques exemples illustrent bien l'impact stratégique et la criticité de tels systèmes. De nombreux verrous associés font l'objet de travaux développés au sein de l'UPS :

- Micro et nanosystèmes hétérogènes communicants autonomes, capteurs et actuateurs intelligents, conception et développement technologique
- **Réseaux de communication** (nouvelle génération de l'Internet, protocoles M2M, etc.), virtualisation, qualité de service, passage à l'échelle, ...
- **Architectures reconfigurables et résilientes**, diagnostic et tolérance aux fautes accidentelles
- **Sécurisation des systèmes vis-à-vis des malveillances** (cryptographie, détection, prévention et tolérance aux intrusions, protection de données personnelles etc.),
- **Perception** (image, son, télémétrie, RFID,...), raisonnement, apprentissage, planification du mouvement
- **Théorie de la commande** (contrôleurs, robustesse, répartition), **décision et optimisation** (ordonnancement, satisfaction de contraintes),
- Développement rigoureux, vérification formelle et test de logiciels critiques

Sous-axes :

- Réseaux de communication et architectures reconfigurables et résilientes
- Sécurisation des systèmes
- Perception, planification, décision et commande

Axe 11 : Energie : stockage conversion, transport, matériaux et optimisation

Les compétences de l'UPS et du site toulousain visent à la **gestion intelligente de l'énergie électrique** contribuent de façon majeure aux solutions de la transition énergétique. La gestion intelligente de l'énergie électrique dans les réseaux embarqués, les micro-réseaux stationnaires ou les réseaux de transport et de distribution reposent sur des recherches qui touchent à la nature des éléments constitutifs et à leur coopération. Les recherches balayent toute la chaîne allant des matériaux pour les composants à la gestion intelligente des réseaux d'énergie multi-sources, notamment embarqués, en passant par des solutions d'intégration poussée pour les composants de puissance et les nouvelles technologies associées ainsi que les réseaux futés. Les points forts du site relèvent des matériaux constitutifs des composants notamment des isolants électriques, couches de passivation et matériaux d'encapsulation, des architectures des composants de puissance et de leur intégration hétérogène tridimensionnelle, de la modélisation et de la caractérisation électrothermique, de la compatibilité électromagnétique, de la robustesse vis-à-vis des décharges électrostatiques et des radiations cosmiques. La gestion intelligente des réseaux futés fait appel à des recherches en optimisation, contrôle et diagnostic, ainsi qu'aux architectures de conversion associées pour répondre aux défis de l'introduction massive d'énergies renouvelables dans le réseau. Le déploiement de ces solutions repose sur le concept d'hybridation de sources d'énergie hétérogènes (éolien, photovoltaïque, etc.) et de caractéristiques complémentaires (temps de réactivité, quantité d'énergie, etc.) dans un schéma coopératif permettant de satisfaire à la demande.

Le **Stockage Electrochimique de l'Energie**, enjeu stratégique mondial, porte sur la synthèse et les caractérisations structurales et électrochimiques de nouveaux matériaux électro-actifs pour le stockage électrochimique et la conversion de l'énergie (supercondensateurs, piles à combustible, batteries Li-ion, batteries Na-ion, batteries à circulation d'électrolytes...). Ces moyens de stockage à grande échelle apportent, par rapport à d'autres solutions, l'avantage de la mobilité et leur développement est donc particulièrement important pour les transports, du véhicule hybride à l'A380. La thématique est structurante tant au niveau du Pôle Universitaire Toulousain que de l'IRT Saint-Exupéry ou de CEATech, avec une forte reconnaissance internationale.

Les laboratoires de Toulouse III coopèrent de longue date sur la thématique des **Ecoulements, réacteurs polyphasiques et plasmas froids** et ont acquis une position de premier plan au niveau international. Ces thématiques sont à la croisée (i) de questions d'ordre fondamental (modélisation, simulation numérique, expérimentation de fluides complexes, turbulents ou ionisés, comportant des bulles, gouttes, particules solides ou cellules vivantes ; problématique du mélange, fragmentation et coalescence) et (ii) d'un large éventail d'applications : génie des procédés, génie pétrolier (participation à l'institut Carnot ISIFOR), génie nucléaire, énergétique, aéronautique et spatial.

Enfin, l'UPS mène des recherches sur les **Matériaux et structures** dont l'étude est un enjeu de première importance pour les secteurs clés de la construction que sont la mécanique et le génie civil. Ces recherches doivent permettre d'accéder à des constructions à la fois plus sûres, plus durables et plus économiques, qu'il s'agisse de structures mécaniques (avions, satellites, éoliennes...) ou de grands ouvrages (bâtiments, ponts, barrages, centrales nucléaires...). Les laboratoires de l'UPS spécialisés dans ces domaines sont reconnus et disposent à la fois de moyens expérimentaux uniques (solllicitations mécaniques complexes, solllicitations thermo-hydro-chemo-mécaniques) et de moyens de modélisation spécifiques qui leur permettent de reproduire et de simuler le comportement des matériaux dans leurs conditions d'usage, mais aussi sous solllicitations accidentelles. Les investigations couvrent un large spectre, de la microstructure à la macrostructure, permettant à ces laboratoires de répondre aux attentes régionales, nationales et internationales (pôle de compétitivité Aérospace Valley, investissement d'avenir dans le domaine des grands ouvrages pour l'énergie). La présence de ce pôle d'excellence au sein de l'université permet à cette dernière de proposer des formations de haut niveau, en phase avec les besoins des industriels à l'échelon national et régional (Airbus, EADS, EDF, Vinci,...).

Sous-axes :

- Stockage Electrochimique de l'Energie
- Ecoulements, réacteurs polyphasiques et plasmas froids
- Matériaux et structures
- Gestion intelligente de l'énergie électrique : De la production jusqu'à l'exploitation

Axe 12 : Instruments et Instrumentation extrêmes

Dans les sciences de la matière, les progrès naissent souvent d'une forte interaction entre idées novatrices, matériaux innovants et instrumentation originale et performante. Ces instrumentations extrêmes, qui vont au-delà des équipements disponibles commercialement, couplées à de nouvelles approches méthodologiques permettent des ruptures scientifiques et technologiques. Il existe à Toulouse une expertise, activement soutenue par la région Midi-Pyrénées, dans le développement d'une instrumentation unique et dans son utilisation en physique fondamentale. Les domaines de cette **Physique de l'extrême** sont 1/ la microscopie électronique en transmission (MET), notamment MET in-situ et holographie électronique, 2/ Les atomes froids, avec le développement d'une véritable ingénierie des ondes de matière, les lasers à impulsion ultracourte et des techniques uniques au monde de mesure de nanocalorimétrie, et de spectrométrie et 3/ les champs magnétiques très intenses (le LNCMI est le plus grand laboratoire de champs intenses en Europe et le deuxième au niveau mondial). Avec un rôle structurant majeur, la position nationale et internationale de Toulouse est particulièrement forte.

Le thème **Nano-Machines**, symbolisé par le tout nouveau Pico-Lab, est unique en Europe et en pleine expansion dans le monde notamment par sa branche technologique « Atome Tech ». Elle regroupe les outils de conception et de fabrication atome par atome de machines et dispositifs, les moyens de caractérisation ultimes puis de nanocommunication et d'encapsulation nécessaires pour exploiter les ressources physiques présentes dans un circuit électronique atomique, moléculaire ou dans une molécule-machine mécanique. Le site regroupe tous les savoirs et savoir-faire pouvant contribuer à dépasser les modes actuels de production des machines miniaturisables, depuis les études les plus fondamentales jusqu'à la recherche de modes de production ayant le moins d'impact sur l'environnement en l'accompagnant par des recherches sur la nouvelle économie réelle qui en résulterait.

Dans le domaine de **l'instrumentation spatiale**, les équipes de l'UPS ont une visibilité internationale pour l'observation de l'Univers (contributions à l'instrumentation pour Herschel, Euclid, SVOM, Athena+, ...), pour l'étude des planètes géantes et leurs lunes (Saturne/Titan : mission Cassini-Huygens ; Jupiter: mission JUICE), l'étude du Soleil et des relations Soleil-Terre (contributions au satellite français TARANIS, et aux missions Solar Orbiter et MMS), pour l'étude des atmosphères et des surfaces des planètes telluriques du système solaire (Mars : ChemCam-MSL, Mars Express, ExoMars, Maven ; Mercure : Bepi-Colombo) et des comètes (mission Rosetta). En observation de la Terre, les équipes de l'UPS sont reconnues internationalement pour leurs contributions décisives à la définition des missions spatiales (SMOS, Venus, Biomass, SWOT, ...). L'instrumentation sol pour l'astrophysique est également un des fleurons de l'UPS avec la définition et la maîtrise d'œuvre d'instruments en spectropolarimétrie et vélocimétrie (ESPaDONs puis SPIrou au CFHT à Hawaï ; NARVAL puis SPIP au Pic de Midi de Bigorre) et des contributions aux instruments pour les très grands télescopes (MUSE sur le VLT). Un autre axe, plus récent mais très prometteur, est celui de l'instrumentation pour l'environnement avec notamment le développement d'instrumentation innovante pour l'étude de la (bio)chimie en milieu marin profond, pour lequel l'expertise acquise dans le spatial (miniaturisation, robustesse, résistance aux conditions extrêmes, ...) constitue un facteur très favorable.

Sous-axes :

- Physique aux conditions extrêmes : microscopie électronique, champs magnétiques intenses, lasers, spectromètres
- Nano-machines
- Instrumentation spatiale