

LE PETIT
TRANSPORTS
DU FUTUR
ILLUSTRÉ

TRANSPORTS DU FUTUR

REGARDS CROISÉS DE CHERCHEUR.E.S

LA DÉPÊCHE
DU MIDI



COLLECTION
PETIT ILLUSTRÉ n°37

4,90€

SOMMAIRE « Le petit transports du futur illustré »

Page 1	Édito
Pages 2-3	Le futur dans la poche
Pages 4-5	Les traitements de surface par plasmas pour l'aéronautique
Pages 6-7	De l'utilisation des matériaux composites dans les transports
Pages 8-9	Matériaux des avions du futur : le métal résiste
Pages 10-11	Des ailes des avions du futur comme celles des grands oiseaux prédateurs
Pages 12-13	L'électronique de puissance embarquée du futur
Pages 14-15	Navires électriques
Pages 16-17	Plasma et propulsion : du rêve à la réalité
Pages 18-19	Des drones pour voir, pour transporter et même manipuler ?
Pages 20-21	Voiture autonome : le défi du zéro défaut pour la fiabilité des systèmes électroniques embarqués.
Pages 22-23	Intégrer la Cyber-sécurité
Pages 24-25	Smart Grid, des réseaux électriques intelligents
Pages 26-27	Comment rendre une machine intelligente ?
Pages 28-29	L'aide à la décision, pour un meilleur compromis décideur-machine
Pages 30-31	Vers l'acceptabilité de l'autonomie des systèmes de conduite
Pages 32-33	Vivre avec la voiture du futur
Pages 34-35	Quelle morale pour les voitures sans conducteur-rice ?
Pages 36-37	Aviation, espace et linguistique
Pages 38-39	Percevoir les sons, une approche du confort acoustique humain
Pages 40-41	La ville connectée
Pages 42-43	Les nouvelles technologies au service de la mobilité pour les personnes déficientes visuelles
Pages 44-45	Des infrastructures en débat
Page 46	Glossaire

Ce *Petit Illustré Transports du futur* contient un encart de 8 pages sur l'Institut de recherche technologique Saint Exupéry, entre les pages 24-25.

ÉDITO

LES ENJEUX DES TRANSPORTS DU FUTUR

Qui ne s'est pas imaginé voyageant à bord de la DeLorean de Retour vers le futur, de la Spinner de Blade Runner ou du célèbre KITT de la série K 2000 ? Ces véhicules du futur, roulant et/ou volant, imaginés dans les années 80 explorent déjà les grands enjeux des transports du futur : les matériaux utilisés, le mode de propulsion, le mode d'alimentation, l'ordinateur comme pilote et aide à la prise de décision. Aujourd'hui, le changement climatique, la réduction des sources d'énergies fossiles, nécessitent des travaux de recherche pour des matériaux toujours plus performants et légers, des moteurs électriques, des batteries plus efficaces et moins polluantes. Du côté de la conduite, l'Intelligence artificielle est de plus en plus présente avec son cortège d'évolutions des usages et de questions éthiques. Enfin, les transports du futur s'inscrivent dans un changement important des modes de vie des usagers, d'un bouleversement de la ville par le développement du numérique et des enjeux fondamentaux autour des grandes infrastructures de transport. C'est aussi et enfin une maîtrise des risques pour tendre vers la sûreté absolue. On voit dès lors la pluridisciplinarité de la thématique : la physico-chimie pour la recherche de matériaux nouveaux avec l'étude de leurs propriétés notamment mécaniques, l'ingénierie pour le design des pièces d'aéronautiques ou l'élaboration de moteurs plus efficaces ainsi que la fiabilisation des processus. Aller vers le véhicule autonome nécessite également des travaux en mathématiques et en informatique tout comme la sociologie pour l'étude des comportements des usagers ou l'analyse des villes et des infrastructures...

Ainsi à Toulouse, ville pionnière dans l'aéronautique, les transports du futur sont-ils un creuset très riche pour cette recherche multidisciplinaire. L'Institut de recherche technologique Saint Exupéry, passerelle entre le monde académique et le monde industriel dans le domaine aéronautique, est donc tout naturellement associé à ce numéro du *Petit Illustré*.

Grâce au partenariat avec *La Dépêche du Midi*, ce 8^e numéro du *Petit Illustré* sera diffusé à un très large public dans toute l'Occitanie, public qui découvrira la grande variété des approches et des disciplines tout comme le rôle fondamental des sciences humaines et sociales dans cette thématique.

Bonne lecture !

Christophe Giraud

Délégué régional CNRS en Midi-Pyrénées

Le futur dans la poche

Connecté, autonome, intelligent, durable, le transport de futur trouve un laboratoire de choix dans l'agglomération toulousaine. Aujourd'hui, c'est surtout le développement d'applications qui permet de changer les habitudes en matière de mobilité urbaine.

Figure 1. La navette EasyMile, véhicule électrique autonome.
© La Dépêche du Midi



Depuis quelques mois, les Toulousain·e·s ont fait connaissance avec la navette EasyMile qui assure la liaison, à une vitesse maximum de 25 km/h, entre la station de métro Palais-de-Justice et le Grand Rond, via les allées Jules-Guesde ; un véhicule en expérimentation, 100% électrique et entièrement autonome*. Plus à l'ouest, sur l'ancienne base aérienne de Francazal, la société californienne Hyperloop TT prépare le train du futur capable de transporter des passager·e·s à quelque 1 200 km/h ! La société Electric Visionary Aircraft s'apprête, elle, à mettre en service le taxi du futur, aérien et autonome.

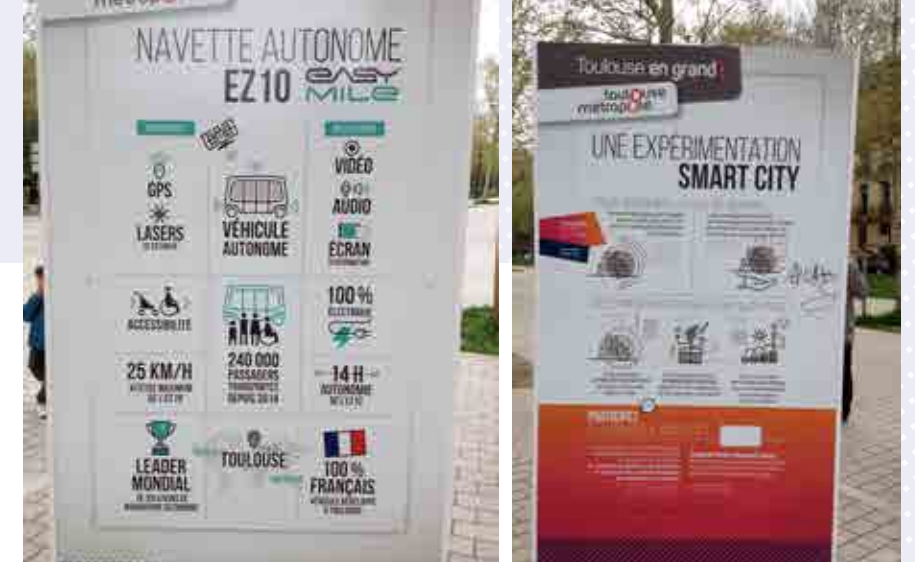
Pour autant, aujourd'hui dans l'agglomération toulousaine, plus de deux tiers des déplacements se font encore en voiture individuelle. Jean-Michel Lattes, premier adjoint à la mairie de Toulouse et vice-président de Toulouse Métropole, en charge des transports explique : « En matière de transports du futur, il y a deux choses, l'outil transport comme la navette Easy-Mile, que nous envisageons surtout comme la solution du "dernier kilomètre". Mais cela ne représente qu'une petite partie des transports du futur. Dans l'agglomération toulousaine, le développement des transports du futur, ce sont des moyens fournis à l'usager·e pour

optimiser son déplacement, et cela passe surtout par le développement de beaucoup d'applications. En réalité, le transport du futur, c'est la possibilité laissée au voyageur·euse d'acheter de la mobilité et cette mobilité est très diversifiée. Cela nous conduit avant tout à proposer du service. » Toulouse est ainsi la première ville de France à avoir dématérialisé les titres de transport et à offrir la réception de la 4G à l'intérieur des rames de métro.

Sur les 115 communes de Toulouse Métropole, représentant une population de 746 919 habitant·e·s (source : Insee 2014), 600 000 personnes empruntent les transports en commun chaque jour dont 450 000 le métro. Néanmoins, l' élu métropolitain ne se satisfait pas de ces chiffres. « L'enjeu de la troisième ligne de métro, en service en 2024, est de toucher davantage qu'aujourd'hui les déplacements salariés-entreprises, c'est pourquoi nous avons retenu un trajet qui dessert les agglomérations de l'Ouest où siègent les entreprises du secteur aéronautique, très gros employeurs. »

Les vieux habits du futur

Jean-Michel Lattes reste convaincu que le transport du futur devra être propre : « Nous sommes dans une phase intermédiaire, la demande sociale est très forte en ce sens », et il se félicite de l'attractivité de l'éco-système toulousain : « Nous travaillons avec les laboratoires des universités toulousaines qui nous permettent d'anticiper le transport de demain. C'est aussi grâce à cet environnement unique en France que Renault a justifié la reprise du site de recherche et développement d'Intel. » L'industriel a expliqué que ce rachat doit lui permettre



« d'accélérer son développement dans le domaine des véhicules connectés et autonomes. » Le CNRS, avec notamment le Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes, l'Enseeiht, l'Insa, l'Enac, l'IRT, possèdent tous des laboratoires de recherche liés aux transports de demain. Malgré cela, l'agglomération toulousaine fait encore confiance aux vieilles recettes comme en témoigne l'arrivée récente des vélos en libre service Indigo qui viennent compléter l'offre de VélôToulouse qui séduit tout de même 20 000 personnes quotidiennement, « c'est l'équivalent de la deuxième ligne de bus la plus fréquentée ! ». Indigo propose des vélos sans station, localisables à partir d'une application mobile. Dans un autre domaine, Toulouse se dotera en 2021 du plus long téléphérique urbain de France, 3 km entre l'Onco-pole et l'Université Toulouse III-Paul Sabatier. Jean-Michel Lattes reste convaincu que le transport du futur, « plus qu'une révolution sur l'outil sera une révolution sur l'usage. On perdra de la possession au profit de la mobilité. »

Jean-Paul Bobin, journaliste

* Voir glossaire p.46

Figure 2. Ci-dessus, les caractéristiques de la navette EasyMile, qui circulait, de manière expérimentale, sur les allées Jules-Guesde à Toulouse. Elle pourrait être adoptée comme « solution du dernier kilomètre » par le réseau de transports en commun de Toulouse Métropole.
© La Dépêche du Midi

LES TRAITEMENTS DE SURFACE par plasmas pour l'aéronautique

Des chercheur-e-s proposent une technologie alternative pour traiter et protéger les pièces aéronautiques.



CONTRIBUTEURS

Richard Clergereaux
et Nicolas Naudé
Laboratoire plasma
et conversion d'énergie
(LAPLACE - CNRS ; Toulouse INP ;
Université Toulouse III -
Paul Sabatier)

Les pièces aéronautiques peuvent être produites à partir d'une grande variété de métaux ou d'alliages métalliques et, actuellement, de plus en plus de matériaux composites. Néanmoins, ces matériaux, à l'état brut, n'ont pas les propriétés finales désirées. Ainsi, le recouvrement de ces pièces aéronautiques par peinture est largement employé, par exemple, pour protéger de la corrosion, donner des propriétés de furtivité, décorer les avions, etc. Par ailleurs, dans de nombreuses étapes de montage, le collage est en passe de remplacer de nombreux procédés traditionnels d'assemblage. Il permet d'assurer, entre autres, l'étanchéité, la transmission des efforts et l'amortissement des bruits. Cependant, les surfaces de ces matériaux sont souvent polluées (dioxyde de carbone, vapeur d'eau,

traces de doigts, restes d'huile de coupe, oxydes, etc.) introduisant des défauts lors de la mise en peinture et/ou des zones de fragilité des assemblages. Ainsi pour former des accroches performantes d'un adhésif ou d'une peinture, il est nécessaire de traiter la surface par des traitements adéquats. Les principales méthodes utilisées sont classées en trois catégories :

- Les traitements mécaniques : le sablage, l'abrasion, les ultrasons...
- Les traitements chimiques : le nettoyage au(x) solvant(s), le nettoyage

- alcalin, les décapages chimiques, l'utilisation de primaire d'adhérence...
- Les traitements physico-chimiques : le flammage, l'exposition aux ultraviolets, le traitement plasma...

Pour les surfaces métalliques, le traitement par voie chimique type oxydation anodique chromique a longtemps été utilisé. Toutefois, cette méthode, efficace et maîtrisée, conduit à un certain nombre de risques environnementaux (utilisation de solvants, création de

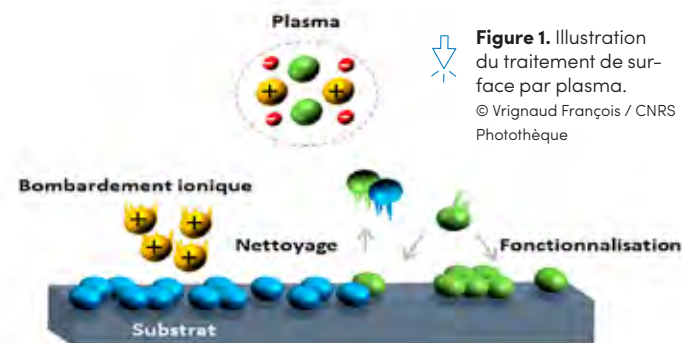


Figure 1. Illustration du traitement de surface par plasma.
© Vignaud François / CNRS Photothèque



Un plasma est obtenu en appliquant un champ électrique suffisamment élevé sur un gaz afin de l'ioniser

composés chimiques volatiles, production d'eau usée, de boues...). D'autre part, dans le cas des composites, l'activation de surface est nécessaire à l'obtention d'une bonne adhésion des peintures.

Utiliser une technologie alternative

Parallèlement dans d'autres domaines de l'ingénierie, de nombreux procédés basés sur l'utilisation d'un plasma* sont développés. Un plasma, couramment appelé 4^e état de la matière, est obtenu en appliquant un champ électrique suffisamment élevé sur un gaz afin d'ioniser celui-ci. Le milieu produit est hautement réactif contenant des électrons, des ions, et des espèces réactives à température ambiante. Ces procédés permettent de réaliser des dépôts de couches minces, de la gravure ou encore des traitements de surface, c'est-à-dire des modifications des liaisons chimiques à la surface d'un objet avec un faible impact envi-

ronnemental et une productivité accrue. Des chercheur-e-s du Laplace ont proposé d'utiliser cette technologie alternative dans des réacteurs à basse pression ou à pression atmosphérique pour traiter des pièces aéronautiques. Ces procédés permettent entre autres d'obtenir des

performances similaires ou supérieures aux traitements chimiques tout en réduisant la production de produits nocifs et en améliorant les conditions de travail des opératrice-eur-s. Elles-ils ont ainsi développé des procédés stables et reproductibles permettant de traiter de grandes surfaces ou encore des objets en 3D. L'enjeu à présent est d'implémenter ces nouveaux procédés sur des lignes d'assemblage.

* Voir glossaire p.46

Figure 2. Plasma micro-onde multipolaire utilisé pour le dépôt de couches minces ou le traitement de surface de matériaux.
© Vignaud François / CNRS Photothèque



De l'utilisation des matériaux composites dans LES TRANSPORTS

Plus légers, aussi résistants que les aciers, les matériaux composites favorisent les économies de carburant. Les recherches actuelles tendent à les rendre encore plus fiables.



CONTRIBUTEUR

Philippe OLIVIER

Institut Clément Ader

(ICA – CNRS ; INSA Toulouse ; ISAE ;
IMT Mines Albi Carmaux ; Université
Toulouse III – Paul Sabatier)

Les matériaux composites sont généralement constitués de fibres de carbone, de verre ou d'autres matières, insérées dans une matrice polymère, céramique ou encore métallique. C'est la combinaison de ces matériaux, sous la forme de fibres de renfort maintenues en position par une matrice, qui confère au composite ses caractéristiques mécaniques et qui définit le procédé de fabrication des pièces.

Dans le secteur des transports aériens, pour ses premières constructions, on est allé chercher le matériau léger et résistant de son environnement immédiat : le bois. Les alliages d'aluminium peu sensibles sur le court terme aux variations de leur environnement (humidité, température) et de rigidité supérieure au bois ont fait leur apparition dans les

années 1930 et sont restés, depuis cette époque, le matériau de « référence » de la construction aéronautique (cellules et voilures). À l'échelle industrielle les matériaux composites apparaissent dans les avions civils dans les années 1970. Ils représentent aujourd'hui plus de 50 % de la masse d'avion tels que les A350 ou B787. Pour le secteur des transports routiers, les attentes des constructeurs étant différentes, les composites sont des polymères à bas coût (polypropylène...) renforcés par des fibres de verres courtes, voire des composites dit bio-sourcés, construits avec des fibres de renfort naturelles telles que le lin.

Pour fixer les idées, on peut dire que les matériaux composites (Figure 1) hautes performances (fibres de carbone et matrice polymère) ont des résistances à la rupture, équivalentes à celles présentées par les aciers

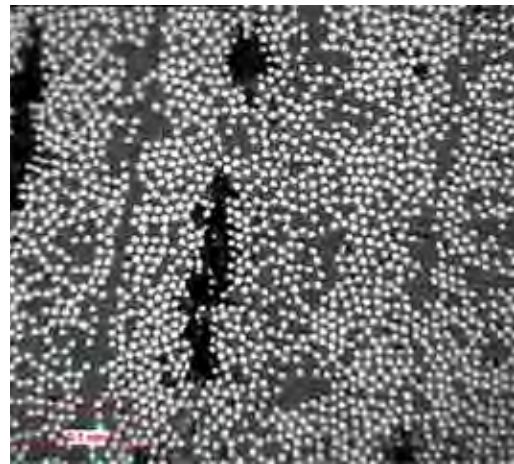


Figure 1. La microstructure d'un matériau composite. Vue en coupe au microscope (agrandissement x 400) d'un matériau composite unidirectionnel hautes performances constitué de fibres de carbone (disques blancs) renforçant une matrice polymère (fond gris de l'image).



Figure 2. Autoclave de polymérisation de l'ICA. Un des outils de production des pièces stratifiées composites hautes performances. © CNRS

pour des masses volumiques nettement plus faibles (1700 kg.m^{-3} contre 7900 kg.m^{-3} environ pour les aciers). On comprend donc tout l'intérêt de ces matériaux pour réduire les masses (et les consommations de carburant) à rigidité équivalente.

Anticiper tout problème de production

Les activités de recherche actuelles sur les matériaux composites en particulier à l'Institut Clément Ader (ICA) se concentrent sur les points suivants. Premièrement, l'ingénierie du matériau lui-même. Il s'agit de la recherche de propriétés spécifiques ou de l'intégration de fonctions avec à la clé des développements d'outils de simulation numérique des matériaux composites afin de pouvoir prévoir leurs propriétés une fois fabriqués. Ensuite, les méthodes de produc-

tion de pièces en matériaux composites. Les objectifs sont de simuler les phénomènes mis en jeu durant la production de pièces de façon à pouvoir anticiper tout éventuel problème de production, défaut ou non-conformité de la matière. Ils portent aussi sur la réduction des temps et des coûts de production avec des procédés automatisés ou à bas coûts. La recherche se concentre alors sur les changements d'état des matériaux au cours de ces procédés de fabrication.

Et enfin, les méthodes de dimensionnement des structures en matériaux composites sous sollicitations de service (durabilité incluse) ou accidentelles. Il s'agit là de disposer d'outils numériques mais aussi expérimentaux permettant de simuler les comportements de pièces de structure composite en service mais aussi durant un choc, un impact et une propagation d'endommagement. 🔗



Les matériaux composites ont des résistances à la rupture, équivalentes à celles présentées par les aciers, pour des masses volumiques plus faibles

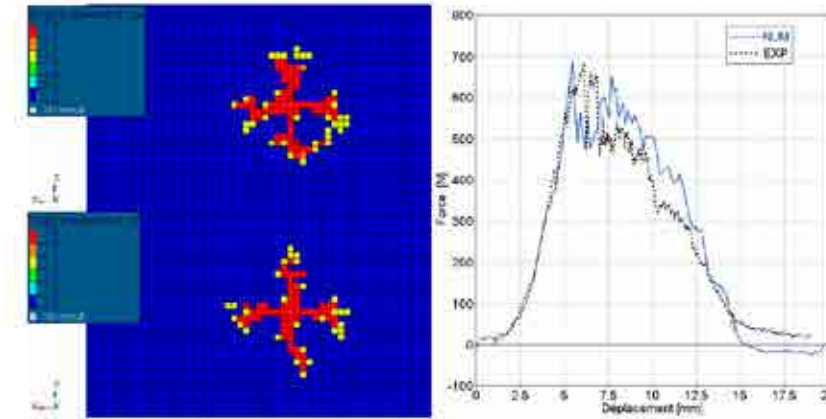


Figure 3. À droite : simulation numérique en éléments finis de l'endommagement (jaune, orange, rouge) consécutif à un impact sur un stratifié en matériau composite. Il s'agit d'une collision de faible énergie entre une plaque en matériau composite (en bleu) et un impacteur (non représenté). La plaque composite est constituée de plusieurs couches (ou plis) de fibres de renfort et la simulation donne l'endommagement sur la face ayant subi l'impact (pli supérieur) ainsi que sur la face opposée (pli inférieur) vers laquelle le dommage se propage. À gauche : comparaison de l'effort d'impact mesuré expérimentalement (EXP) et simulé numériquement (NUM). © ICA

Matériaux des avions du futur

LE MÉTAL RÉSISTE



CONTRIBUTEURS

Joël Douin, Muriel Hantcherli,
Jean-Philippe Monchoux
Centre d'élaboration de matériaux
et d'études structurales du CNRS
(CEMES)

Pour améliorer les performances d'un avion, on est amené à pousser les limites d'utilisation des matériaux qui le constituent. Pour ces applications de pointe, les alliages métalliques restent le meilleur choix.

Pour qu'un avion aille tout aussi vite en consommant moins de kérosène, la recette est bien connue : il suffit qu'il soit moins lourd. Une tendance actuelle pousse à l'utilisation de plus en plus prononcée de matériaux composites, a priori plus légers. Mais certaines parties d'un avion subissent des contraintes gigantesques et quelquefois brutales, le train d'atterrissage en est un bon exemple. D'autres sont soumises à des températures élevées, jusqu'à 1 300°C à l'intérieur des moteurs. Pour ces

éléments, les métaux sont irremplaçables, car ce sont les seuls matériaux pouvant supporter de telles conditions tout en étant capables de subir des chocs violents sans rompre.

Améliorer les propriétés mécaniques des métaux

Le métal le plus utilisé dans l'aéronautique est l'aluminium, car léger et peu cher. Il constitue près de 70% des matériaux de l'Airbus A380. Mais celui qui a déjà utilisé de l'aluminium ménager sait combien il peut être mou. Cette pro-

priété est en fait commune à tous les métaux à condition qu'ils soient très purs, ce qui est le cas pour l'aluminium ménager, pur à 99 %. Pour qu'un métal soit plus résistant, il faut lui mélanger une petite quantité d'autre chose. Comme le chocolat qui résiste mieux quand on lui incorpore de très petits morceaux de noisettes, les éléments rajoutés dans le métal, pourvu qu'ils soient très bien choisis, peuvent augmenter les propriétés mécaniques de ce qu'on appelle alors un alliage, jusqu'à multiplier par 100 sa résistance mécanique (Figure 1). Au-dessus de 200°C, l'aluminium



Figure 1. Utilisation d'alliages métalliques dans des zones très sollicitées de l'avion
© J. Douin (CEMES)



Les éléments rajoutés dans le métal peuvent multiplier jusqu'à 100 la résistance mécanique de l'alliage

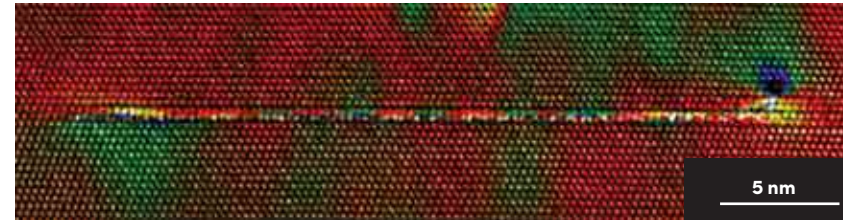


Figure 2. Alliage d'aluminium. Du magnésium et du silicium ajoutés à l'aluminium se combinent pour former de petits défauts qui vont donner toute sa résistance à l'alliage. En observant avec un très fort grandissement les atomes (points clairs) on détermine comment la matière est perturbée au voisinage du défaut. © M. Le Fournier (CEMES)

ne peut plus être utilisé, car trop mou. Les scientifiques du CEMES étudient des alliages de titane résistant mieux à la chaleur et pouvant être utilisés au voisinage des réacteurs, mais ces matériaux sont plus lourds et surtout plus chers (Figure 2). Ils-elles étudient aussi des alliages à base de nickel, appelés superalliages, certes encore plus lourds, mais qui atteignent des résistances exceptionnelles même à très haute température (Figure 3). La détermination de la nature et de la quantité des éléments à rajouter pour améliorer les propriétés mécaniques des métaux est d'au-

tant plus compliquée que les façons de les mélanger sont multiples et très subtiles. La difficulté du travail réside dans ce que les propriétés mécaniques des métaux sont directement liées à la microstructure à l'échelle la plus fine et nécessite d'utiliser les techniques d'observation de pointe de la microscopie électronique en transmission. À terme, une meilleure compréhension des mécanismes microscopiques permettra d'assurer une réduction de l'empreinte carbone des avions tout en leur assurant un niveau de fiabilité le plus élevé possible. ■

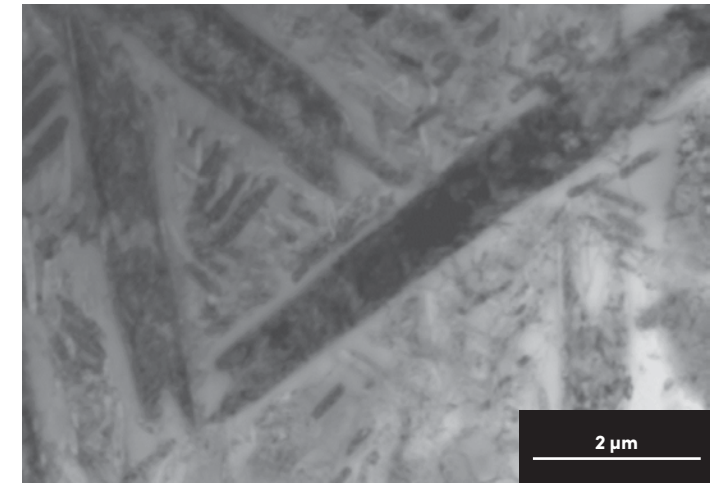


Figure 3. Alliage de titane. En ajoutant jusqu'à 12 autres éléments à du titane, les chercheurs fabriquent une structure complexe, mélange imbriqué de cristaux de structures différentes et aux propriétés mécaniques exceptionnelles. © N. Escalé (CEMES)

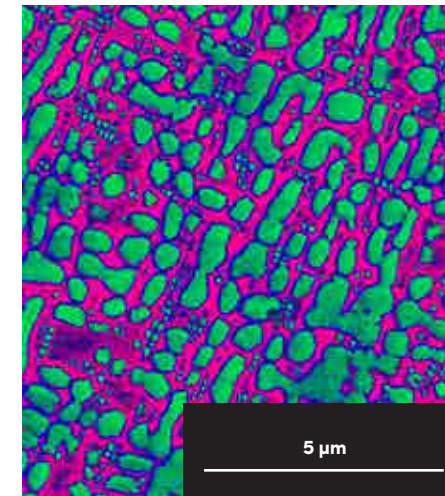


Figure 4. Super alliage à base de nickel utilisé pour les aubes de turbine dans les parties les plus chaudes des réacteurs. La phase colorée en rose sur l'image assure la malléabilité du matériau et ce sont les précipités (colorés ici en vert) qui assurent la très grande rigidité. © M. Hantcherli (CEMES)

DES AILES D'AVIONS DU FUTUR comme celles de grands oiseaux prédateurs



CONTRIBUTRICE/ CONTRIBUTEUR

Marianna Braza

Institut de mécanique des fluides
de Toulouse (IMFT – CNRS ;
Toulouse INP ; Université
Toulouse III – Paul Sabatier)

Jean-François Rouchon

Laboratoire plasma et conversion
d'énergie (LAPLACE – CNRS ;
Toulouse INP, Université
Toulouse III – Paul Sabatier)

Les oiseaux prédateurs sont capables d'exploiter instantanément l'impact du vent sur leurs ailes par l'intermédiaire de leur système musculaire et nerveux, de manière à déformer immédiatement et de façon optimale leurs ailes. De plus, ils peuvent faire vibrer savamment leurs ailerons, plumes et plumettes afin d'augmenter leur portance en s'abaissant sur leur proie, et de diminuer leur résistance au vent et le bruit aérodynamique généré par le battement des ailes. Ils arrivent ainsi à optimiser en même temps l'ensemble des performances aérodynamiques. S'appuyant sur ces observations, des chercheur-e-s

Les ailes des avions du futur s'inspireront des mouvements de celles des grands oiseaux prédateurs, permettant des économies de carburant et assurant une meilleure sécurité et une moindre pollution sonore. Deux laboratoires toulousains y travaillent activement en collaboration avec Airbus.

travaillent sur des concepts novateurs de design d'ailes d'avion du futur flexibles, déformables et capables de vibrer comme celles de grands oiseaux prédateurs. Ces travaux s'inscrivent dans la dynamique de l'avion tout électrique du futur. Ainsi, l'équipe de recherche utilise des matériaux intelligents dont la forme peut être modifiée par stimulation électrique (« mor-

phing »). Les ailes d'avion de génération actuelle ont des formes inspirées des ailes d'oiseaux de grande envergure mais elles ne sont pas déformables. Les mouvements de différentes parties de l'aile sont rigides et assurés par des actionneurs mécaniques des volets hypersustentateurs, situés en arrière de l'aile (bord de fuite). Ils simulent par leur mouvement une



Figure 1. Mouvement de l'air autour de cette aile d'avion de type A320 illustrant la structure des turbulences et des tourbillons qui seront manipulés à l'aide du morphing. © G.Jodin, N. Simiriotes



Figure 2. Prototype d'aile d'avion de type A320 avec volet hypersustentateur de corde de 1m dans la soufflerie S1. Mesures pour la phase de décollage. © J.F. Rouchon / M. Braza.

analogie à la cambrure de l'aile de l'oiseau. De même, les ailerons de l'extrémité des ailes de l'avion permettent la manœuvrabilité, par analogie aux extrémités des ailes d'oiseau. Les chercheur-e-s de l'Institut de mécanique des fluides de Toulouse (IMFT) et du Laboratoire plasma et conversion d'énergie (LAPLACE) étudient des concepts pour aller beaucoup plus loin en préconisant l'utilisation d'ailes flexibles, dont la forme sera contrôlée électriquement, en temps réel, grâce à des matériaux électroactifs, les « Alliages à mémoire de forme - AMF ». Les ailes pourront ainsi simultanément se cambrer considérable-

ment à basse fréquence (un cycle par seconde) et battre plus vite dans la région située au bout de chaque section, grâce à des matériaux se déformant rapidement sous l'effet d'une tension électrique (effet piézoélectrique).

Performances améliorées

Un verrou à lever est d'assurer que la nouvelle structure déformable et vibrante est capable de supporter et de rendre les forces nécessaires, exercées par l'air sur la surface portante. En imitant ce qui se passe chez les oiseaux, les chercheur-e-s arrivent à manipuler la turbulence

pour renforcer les tourbillons bénéfiques et atténuer ou supprimer les néfastes (Figure 1). Les performances attendues sont de 3 à 5 % de réduction de traînée, conduisant à 1 à 2 % d'économie de carburant, de 5 % d'augmentation de portance et une réduction du bruit aérodynamique de l'ordre de 8%. Ces ailes du futur seront beaucoup plus silencieuses, consommeront bien moins de carburant et auront des performances aérodynamiques améliorées assurant une sécurité accrue lors de toutes les phases de vol : décollage, atterrissage, croisière. Ces travaux se font en étroite collaboration avec Airbus au sein d'un consortium européen (www.smartwing.org/SMS/EU). Airbus vise à réaliser ces concepts pour une nouvelle forme du volet hypersustentateur à l'horizon 2020. 🏆



Des ailes flexibles dont la forme sera contrôlée électriquement, en temps réel

L'ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE embarquée du futur

Une équipe du Laboratoire plasma et conversion d'énergie (LAPLACE) s'intéresse à l'élaboration de nouvelles topologies de convertisseurs impliquant un grand nombre de cellules de conversion.



CONTRIBUTEUR

Marc Cousineau

Laboratoire plasma et conversion d'énergie (LAPLACE - CNRS ; Toulouse INP ; Université Toulouse III - Paul Sabatier)

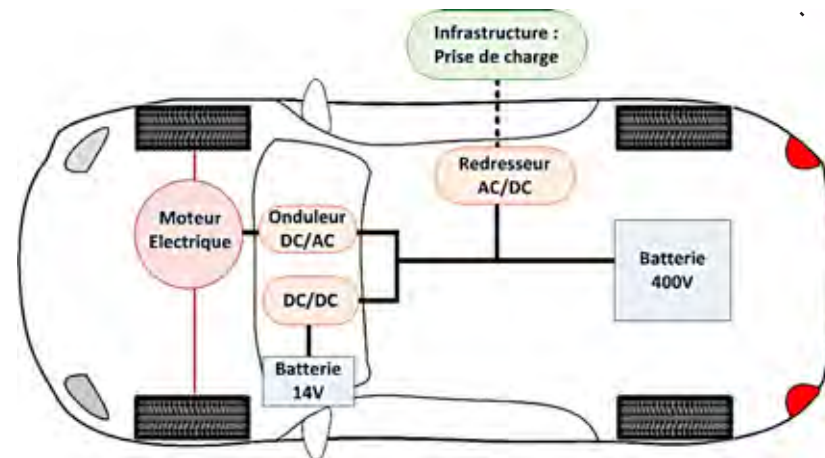


Figure 1. Électronique de puissance d'un véhicule « tout électrique » incluant son chargeur embarqué (redresseur AC/DC : électronique transformant un courant alternatif en courant continu), son convertisseur de traction réversible (onduleur DC/AC : électronique transformant un courant continu en courant alternatif) et son convertisseur DC/DC réversible (électronique permettant de transformer un courant continu en un autre courant continu de valeur différente).

© Timothé Rossignol, manuscrit de thèse

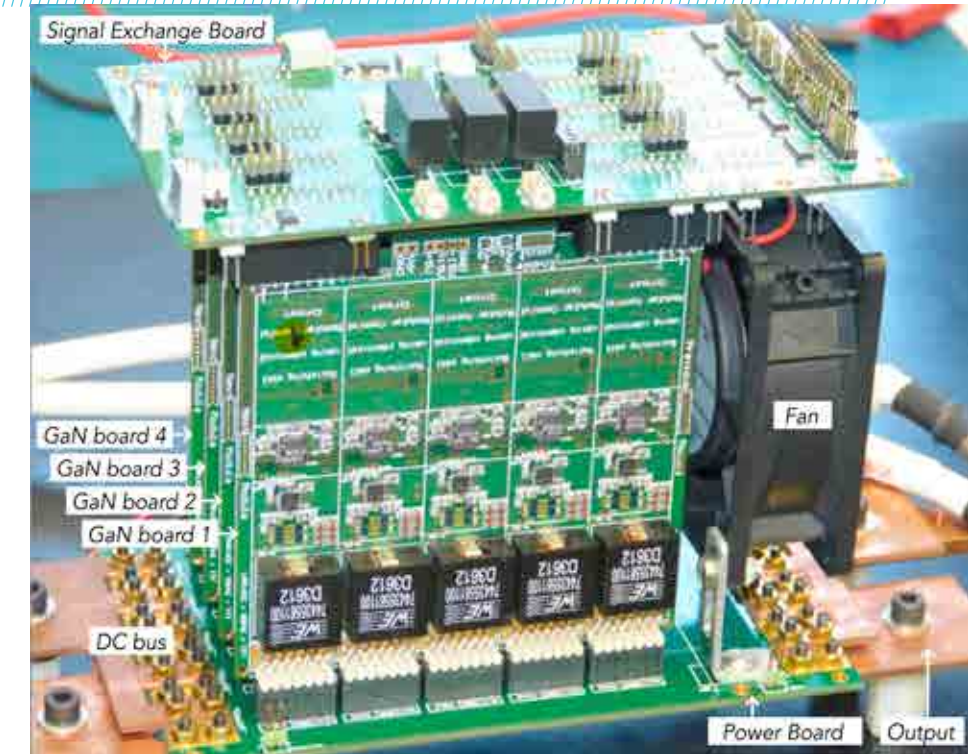
cacité et dans un volume réduit, la conversion de courant d'un mode continu (courant continu des batteries) en courant alternatif (courant alternatif du moteur). Les scientifiques cherchent donc à optimiser les performances de ces convertisseurs en réduisant leur volume, leur poids et en améliorant leur rendement énergétique.

Des vitesses de commutation élevées

Ainsi une équipe toulousaine de recherche s'intéresse à l'élaboration de nouvelles topologies de convertisseurs impliquant un grand nombre de cellules de conversion. L'association de ces cellules, soit en série soit en parallèle, rend possible l'usage d'interrupteurs de puissance de plus faible calibre en tension ou en courant, offrant des vitesses de commutation très élevées. Les scientifiques améliorent ainsi de manière significative le rendement, réduisant le volume des dissipateurs thermiques et l'encombrement des éléments de stockage énergétique (inductances et capacités).

L'une des difficultés rencon-

Figure 2. Convertisseur développé au LAPLACE incluant 25 cellules parallélisées à commande entrelacée. Chaque cellule utilise deux transistors pouvant fournir 1/25^e du courant total. Elle est pilotée de façon décentralisée par un contrôleur local communiquant avec ses deux proches voisins. Ce type de contrôle offre une grande flexibilité en termes de nombre de cellules utilisables et d'aptitude à la reconfiguration.



trées dans ces travaux par les chercheur·e·s réside dans la complexité de l'organe de contrôle devant délivrer des signaux de commande spécifiques à chaque cellule, afin de garantir la régulation et l'égalisation des variables du système. L'originalité de la solution trouvée consiste à effectuer une décentralisation de la commande en élaborant des éléments de contrôle locaux, collaboratifs, communi-



L'enjeu est d'optimiser les performances des convertisseurs

quant avec leurs proches voisins, et permettant d'obtenir une régulation correcte de l'ensemble, ceci pour un nombre quelconque de cellules assemblées.

Dans un proche avenir, l'émergence d'une nouvelle génération de convertisseurs à très forte densité de puissance impliquant un foisonnement de cellules sera alors rendue possible grâce à l'usage de ce type de méthode de contrôle à la fois modulaire et décentralisée. ■

NAVIRES ÉLECTRIQUES

Le Laboratoire plasma et conversion d'énergie (LAPLACE) participe au développement d'une propulsion navale innovante à travers un moteur original qui garantit les performances imposées par le gabarit naval « couple-vitesse ».



CONTRIBUTRICE

Maria David

Laboratoire plasma et conversion d'énergie (LAPLACE-CNRS ; Toulouse INP ; Université Toulouse III – Paul Sabatier)

La conception d'un « Clean Ship », associée au respect environnemental du « Clean Sea », et les postulats du Grenelle de la mer ont imposé aux industriels du secteur naval et aux académiques les activités de recherche innovantes autour d'un navire « plus électrique » voire « tout électrique ». Ce système embarqué nécessite une quantité d'énergie à bord en croissance constante. Sa gestion optimisée, entre la production et la consommation, devient primordiale. Un navire électrique regroupe deux ensembles : production d'énergie et propulsion. Ainsi, l'énergie est produite par plu-

sieurs générateurs entraînés, soit par un moteur thermique (Diesel), soit par des turbines à gaz. L'énergie obtenue est distribuée à tous les utilisateurs du bord et alimente un ou plusieurs équipements de propulsion. À l'opposé d'une propulsion directe avec un moteur thermique agissant directement sur des hélices, un équipement de propulsion moderne comprend toujours un moteur électrique opérant majoritairement à vitesse variable et alimenté par un convertisseur statique (un fonctionnement comparable à une voiture hybride : (Figure 1). Le propulseur (Figure 2c) est constitué d'un moteur électrique de propulsion, de paliers, et de

joints étanches qui sont entièrement intégrés dans une nacelle orientable fixée sous la coque à l'extérieur du navire, entraînant une hélice à pas fixe.

Plusieurs avantages

Ses avantages sont : une poussée de l'hélice orientable sur 360°, ce qui garantit entre autre une très bonne manœuvrabilité, la réduction du volume et du poids des machines à bord du navire, un bon rendement hydrodynamique, surtout à vitesse élevée, et la possibilité d'installation quelques semaines seulement avant le lancement du navire. Ce type de propulsion a été intégré dans le navire militaire BPC Mistral et dans le paquebot Queen Mary (Figures 2a et 2b). 🌊

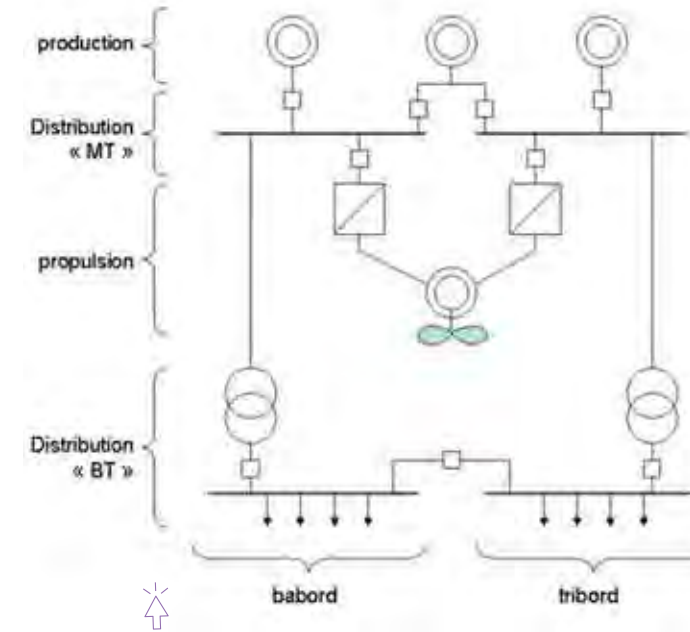


Figure 1. Structure simplifiée de la distribution électrique d'un navire à une seule ligne d'arbre. © DR

Recherche du meilleur rendement

Actuellement, les moteurs à courant alternatif asynchrone et synchrone occupent une large place dans les applications des propulsions électriques. La recherche du meilleur rendement de ces ensembles est devenue un objectif principal des études menées dans ce domaine. Le LAPLACE, en collaboration avec la Direction générale de l'armement et des industriels, participe au développement d'une propulsion navale innovante avec une Machine asynchrone doublement alimentée (MADA). Cette machine de conception unique, réalisée en tant que démonstrateur de 300kW, représente une solution attractive pour la propulsion navale taille réelle de 2 à 3 MW. Ce moteur original ne comporte pas d'aimant permanent et possède une puissance du stator égale à celle du rotor. Il exige des commandes rapprochées et des algorithmiques efficaces afin de garantir les performances imposées par le gabarit naval « couple-vitesse ». D'autres points sont en cours d'étude comme l'optimisation de l'efficacité énergétique, la commande sans capteurs, l'amélioration de la fiabilité et de la disponibilité du système ou la caractérisation vibratoire et acoustique du système.



Figure 2. Navires à propulsion électrique. Le bâtiment de projection et de commandement (BPC) Mistral (a) et le paquebot Queen Mary 2 (b), propulsion électrique Azipod D, ABB, version ouverte et sa version canalisée (c) qui a permis d'augmenter de 45% l'efficacité énergétique des moteurs. © DR

Un équipement de propulsion moderne comprend toujours un moteur électrique opérant majoritairement à vitesse variable et alimenté par un convertisseur

PLASMA ET PROPULSION

du rêve à la réalité



CONTRIBUTEURS

Jean-Pierre Bœuf
Freddy Gaboriau
et Laurent Garrigues

Laboratoire plasma et conversion
d'énergie (LAPLACE - CNRS ;
Toulouse INP ;
Université
Toulouse III - Paul Sabatier)

Le Laboratoire plasma et conversion d'énergie (LAPLACE) travaille sur des moteurs de seconde génération permettant à une sonde d'exploration spatiale d'obtenir une forte vitesse d'éjection et une forte poussée.

Tsiolkovski, scientifique russe, père de l'astronautique moderne démontre, en 1903, que pour assurer la mission d'un véhicule spatial, la quantité de carburant est d'autant plus faible que la vitesse d'éjection du carburant est grande. Les scientifiques cherchent alors la meilleure façon d'augmenter cette vitesse. La méthode usuelle consiste à utili-

ser une réaction chimique de combustion produisant de l'énergie qui permet l'éjection d'une forte quantité de gaz, correspondant à la poussée (exemple dans la fusée Ariane). Il existe un concept alternatif, le propulseur à plasma*, qui permet une forte vitesse d'éjection des particules mais une poussée plus faible, utile en vol stationnaire. Cette grande vitesse d'éjection est due au fait que le plasma contient des particules chargées

qui peuvent être accélérées par des champs électriques.

Principe des propulseurs à plasma, dit de Hall

Le carburant des engins spatiaux, l'ergol, qui est un gaz neutre, est transformé sous l'effet d'une décharge électrique en un plasma, c'est-à-dire un gaz d'atomes et de particules chargées. Parmi les nombreux concepts de propul-



Figure 1. Photo du propulseur en marche ; le plasma apparaît comme un anneau blanc ; le plasma émet de la lumière car les atomes du gaz sont ionisés et excités par les électrons énergétiques, comme dans une lampe fluorescente. © Freddy Gaboriau/LAPLACE

seur à plasma, les chercheur-e-s du LAPLACE travaillent sur le propulseur dit de Hall. Celui-ci est basé sur l'accélération des ions du plasma par un champ électrique axial créé par une tension électrique appliquée entre une anode placée au fond d'un canal cylindrique et une cathode placée à l'extérieur (Figure 2). De plus, des bobines de fil sont placées autour de ce canal pour créer un champ magnétique qui confine les particules chargées dans la zone de la décharge. La combinaison du champ électrique et du champ magnétique guide les particules selon le courant dit de Hall et permet d'optimiser la production du plasma. L'éjection des particules chargées à l'extérieur du moteur fournit la poussée à l'engin spatial. Ces propulseurs sont adaptés à la tâche de maintien sur orbite géostationnaire des satellites en accélérant des ions à des vitesses de 20 km/s mais pour des petites poussées (très inférieures au Newton). Elles ne permettent pas d'envisager l'utilisation de ces propulseurs pour des changements d'orbite.

Propulseur de Hall de seconde génération

Le laboratoire LAPLACE travaille en parallèle sur des moteurs de Hall de seconde génération qui combineraient forte vitesse d'éjection de particules et forte poussée. En effet, pour s'échapper de l'attraction terrestre, une sonde d'exploration a besoin d'une forte poussée alors que durant sa mission de croisière, elle a besoin d'une forte vitesse d'éjection de l'ergol. Les études menées portent sur la proposition et la caractérisation de concepts de moteurs de Hall plus versatiles par des approches couplées entre magnétostatique, caractérisation expérimentale et modélisation des plasmas. Une configuration d'un propulseur de Hall à topologie magnétique variable a ainsi été proposée, réalisée et validée. En parallèle, un nouveau concept de moteur où la génération du plasma et l'accélération des ions se font dans deux chambres distinctes est en cours de test.

* Voir glossaire p.46

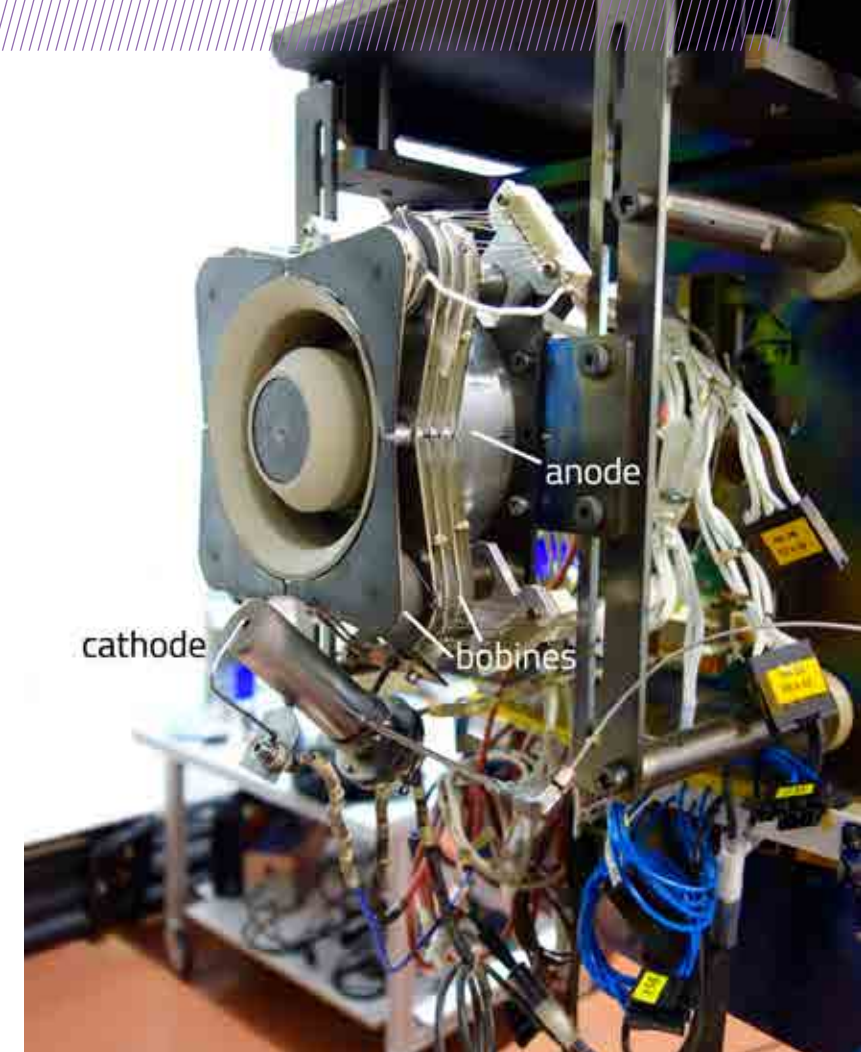


Figure 2. Prototype de propulseur de Hall à topologie magnétique flexible développé au LAPLACE, monté sur un banc de test de l'ESA. Le plasma est formé dans un canal entre deux cylindres en céramique. Un champ magnétique radial créé par des bobines dans la région du plan de sortie du canal ralentit les électrons dans leur progression vers l'anode. Ceci induit une chute de conductivité du plasma et donc une augmentation du champ électrique dans cette région. Les ions sont extraits du plasma par ce champ électrique. © D. Harribey/LAPLACE



Figure 1. LAAS-Aerial-Manipulator. Muni d'un bras et d'algorithmes qui contrôlent à la fois le vol et le bras, un drone se transforme en robot aérien. © LAAS-CNRS



CONTRIBUTEUR

Simon Lacroix
Laboratoire d'analyse et
d'architecture des systèmes du
CNRS (LAAS-CNRS)

DES DRONES pour voir, pour transporter, et même manipuler ?

Les domaines d'utilisation des drones augmentent régulièrement. Ces appareils autonomes pourraient bien, dans un avenir proche, non seulement transporter des marchandises, mais aussi se transformer en robots aptes à exécuter des travaux aériens périlleux.

La multiplication très rapide des drones n'a échappé à personne : ils sont maintenant très souvent utilisés pour tourner des séquences pour le cinéma, la télévision, ou même lors d'une fête familiale. Mais on les utilise aussi pour inspecter des barrages, pour observer des parcelles agricoles et déterminer les zones à fertiliser, ou pour cartographier précisément des sites archéologiques. La police et l'armée les apprécient particulièrement pour obtenir des informations sur des sites distants ou dangereux. Dans toutes ces situa-

tions, les drones permettent d'acquérir des images aériennes, offrant ainsi un point de vue inhabituel ou sur des zones inaccessibles.

Qu'est-ce qu'un drone ?

Mais au fait, qu'est-ce qu'un drone ? C'est un aéronef sans pilote à bord, qui exécute de manière autonome* des ordres de haut niveau qui lui sont donnés, tels que « *atteindre une position* » ou « *survoler une zone* ». En ce sens, les progrès dans les pilotes automatiques des avions modernes font

qu'il s'agit pratiquement de drones ! Dans l'histoire de l'aéronautique, c'est le transport de marchandises et de passager-e-s qui a poussé le développement technique et commercial. Est-ce que les drones vont suivre la même évolution, et bientôt être massivement utilisés pour le transport ?

De très nombreux travaux sont actuellement menés pour développer des drones capables de transporter des marchandises. Chacun pense immédiatement à la livraison de petits objets commandés sur Internet, voire... de pizzas ! Il est peu probable que les ciels de nos villes soient envahis par des

drones qui livrent des particuliers : où vont ils se poser ? Comment garantir qu'aucun ne tombera ? La dépense d'énergie est-elle raisonnable ? Il y a cependant déjà des contextes où la livraison par des drones est opérationnelle et utile : ainsi, au Rwanda, ils sont régulièrement utilisés pour apporter des poches de sang dans des centres médicaux de campagne difficilement accessibles par d'autres moyens.

En ce qui concerne le transport de passager-e-s, les industriels de l'aéronautique développent et testent actuellement des prototypes, et beaucoup de difficultés restent à

résoudre : la sécurité en premier lieu, et aussi la gestion du trafic. L'énergie nécessaire au vol sera cependant toujours supérieure à celle nécessaire au roulement, et il ne faut pas espérer voir nos villes libérées des transports terrestres. Il y a par contre un domaine où les drones vont surpasser les capacités des aéronefs pilotés. Ainsi le LAAS-CNRS mène-t-il des recherches sur les robots aériens, drones dotés de capacité de manipulation physique. Grâce à des algorithmes avancés de contrôle, ces drones peuvent évoluer au contact de l'environnement, ou bien coopérer pour transporter et manipuler



Figure 2. LAAS-Tilt-Hex : Grâce à des rotors orientables, un drone peut se stabiliser dans n'importe quelle configuration, et ainsi exercer des forces de contact. Ici, le robot aérien inspecte un tube avec un échographe électromagnétique. © LAAS-CNRS



Figure 3. LAAS-FlyCrane : En coopérant étroitement entre eux, trois drones peuvent transporter et orienter précisément une pièce dans les trois dimensions. © LAAS-CNRS



Les drones pourront être utilisés pour la construction ou la maintenance de grandes structures

précisément une pièce de grande dimension. De tels drones pourront être utilisés pour la construction et la maintenance de grandes structures, par exemple pour assembler un pylône électrique en montagne, ou bien pour nettoyer les vitres des gratte-ciel ! 📢

* Voir glossaire p.46

VOITURE AUTONOME :

le défi du zéro défaut pour la fiabilité des systèmes électroniques embarqués



CONTRIBUTRICE
CONTRIBUTEURS

Marise BAFLEUR
Fabrice CAIGNET
Nicolas NOLHIER

Laboratoire d'analyse et
de l'architecture des systèmes du
CNRS (LAAS-CNRS)

Les premières voitures pour le grand public ont fait leur apparition au début du XX^e siècle. À cette époque, à part le démarrage électrique et l'éclairage, tout était mécanique et la voiture était peu fiable. Dans les années 90, grâce à l'avènement de l'électronique, la voiture est devenue de plus en plus performante (allumage électronique), plus sûre (ABS, airbag, ESP) et intelligente (système anti-collision). Nous sommes au début du XXI^e siècle et les premières voitures autonomes* commencent à circuler. La voiture actuelle est un véritable ordinateur

sur roues. Elle est truffée de capteurs, d'actionneurs, et plusieurs microprocesseurs analysent en temps réel les données provenant du véhicule et de son environnement. Le nombre de composants électroniques dans l'automobile est tel que ceux-ci peuvent en constituer jusqu'à 50% de son prix.

Des agressions proviennent de l'environnement naturel

Une automobile est soumise à de nombreuses agressions qui peuvent affecter la fiabilité des systèmes électroniques embarqués. Elles peuvent induire une défaillance

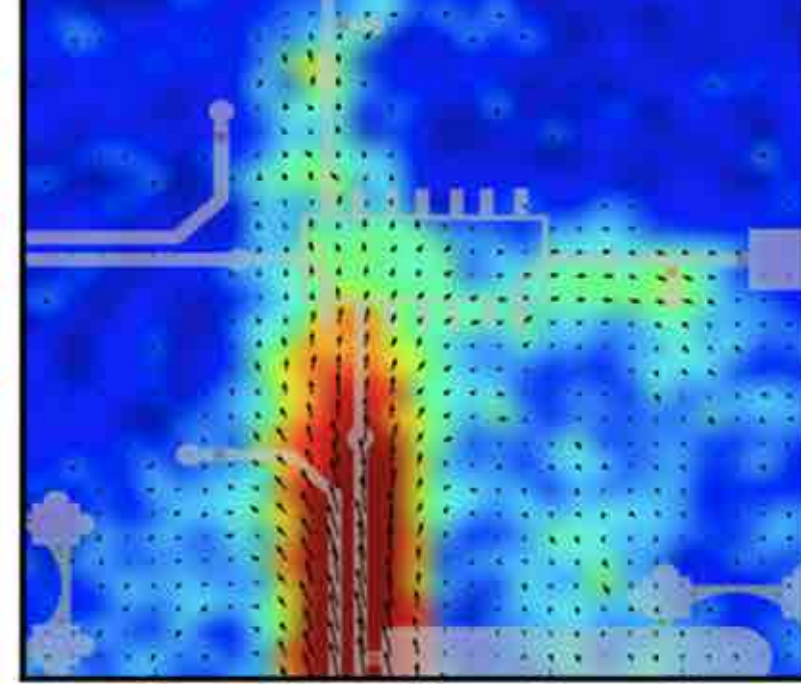
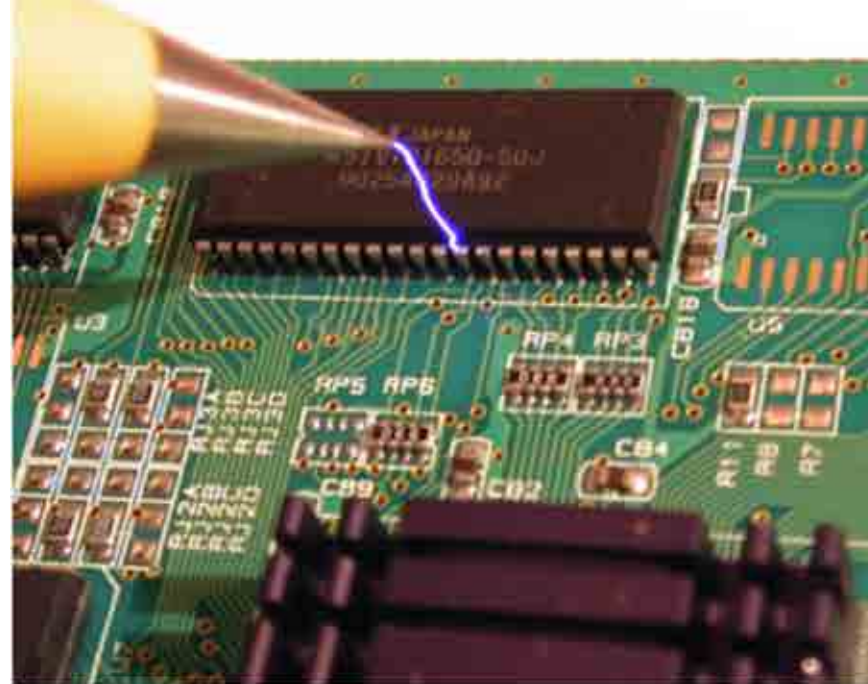
temporaire (erreur de l'ordinateur de bord, par exemple) ou même provoquer la destruction du composant agressé. Ces défaillances sont inacceptables car la sécurité des passagers est aujourd'hui en grande partie confiée à l'électronique et le sera d'autant plus dans les véhicules autonomes. L'exigence de fiabilité requise est ainsi proche du zéro défaut : 1 ppm, c'est-à-dire une défaillance par million de voitures vendues. Des agressions proviennent de l'environnement naturel : température, vibrations, humidité, radiations cosmiques. D'autres sont provo-

quées par l'utilisateur-rice : génération de charges électrostatiques (ESD) par les vêtements synthétiques, par exemple. Enfin certaines résultent de perturbations électromagnétiques induites par le moteur ou l'usage d'appareils électroniques comme le téléphone portable. Une agression ESD, comme illustré dans l'exemple ci-dessus, peut être générée par le frottement lorsque vous enlevez votre laine polaire et les charges électrostatiques associées peuvent induire une tension de quelques milliers de volts. Si vous touchez alors une pièce métallique, vous allez ressentir une courte ($\leq 1 \mu s$) décharge

électrique. Un composant électronique embarqué dans l'automobile peut être soumis à plusieurs dizaines de milliers d'agressions ESD au cours de sa vie. C'est ainsi que, fin des années 90, des milliers de voitures ont dû être rappelées suite au déclenchement intempestif de l'airbag induit par une agression ESD. Pour se protéger de telles agressions, il faut d'une part, comprendre comment elles se propagent dans le système et le perturbent et, d'autre part, mettre en œuvre une stratégie de protection. Il s'agit de développer des méthodologies de modélisation et de caractérisation permettant

d'analyser et de prédire le comportement du système lors d'une agression ESD et de vérifier la stratégie de protection. La protection consiste à insérer des dispositifs dédiés au niveau de toutes les entrées et sorties du composant électronique. Ces protections jouent un rôle semblable à celui du paratonnerre vis-à-vis de la foudre. Le défi pour ces systèmes embarqués est que ces protections doivent être les plus petites et les moins coûteuses possibles, tout en maintenant les fonctionnalités. Grâce à ces techniques, il est possible d'optimiser le nombre, la taille et l'efficacité des protections. 

* Voir glossaire p.46



 **Figure 1.** Vue de gauche : Agression ESD (arc électrique) sur une carte électronique. Vue de droite : visualisation de la propagation de l'agression ESD dans une carte électronique (image obtenue sans contact par mesure du champ électromagnétique induit par la propagation de l'agression ESD).
© LAAS-CNRS

INTÉGRER LA CYBER-SÉCURITÉ

Avec l'automatisation croissante des véhicules, voitures comme avions, l'informatique occupe une place de plus en plus importante. Elle peut-être le maillon faible dont il faut éliminer tous les défauts et qu'il faut protéger d'attaques éventuelles. Des chercheur-e-s toulousain-e-s proposent des méthodes pour répondre à ces défis lors de la conception puis de l'utilisation des véhicules.



CONTRIBUTEURS

Vincent Nicomette

Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes du CNRS (LAAS-CNRS)

Marc Pantel

Institut de recherche en informatique de Toulouse (IRIT - CNRS ; Toulouse INP ; Université Toulouse 1 Capitole ; Université Toulouse - Jean Jaurès ; Université Toulouse III - Paul Sabatier)

L'autonomie* dans les transports (voitures, avions, trains) se développe rapidement en exploitant les techniques d'Intelligence artificielle* et les moyens automatiques de collecte et d'échanges d'information. La mise en place des réseaux sans fil permet aux véhicules d'obtenir des informations d'assistance à la conduite depuis des serveurs distants, mais également de communiquer directement les uns avec les autres. La sécurité des systèmes de transport recouvre la protection contre les fautes accidentelles, « safety » en anglais (défaillance des composants matériels, erreurs de conception logicielles) et contre les fautes intentionnelles, « security » en anglais (attaquant qui vise intentionnellement à provoquer



Figure 1. Schéma représentant l'ensemble des systèmes informatiques et de communication d'une voiture moderne. © CNRS

une défaillance du système). La sécurité des transports est un problème public et les états imposent de nombreuses règles pour assurer la sécurité des usager-e-s des transports.

Sûreté du logiciel

Pour diminuer les fautes accidentelles, il faut maîtriser la construction des logiciels, de l'analyse du besoin de l'utilisateur-trice jusqu'à son déploiement en conditions opérationnelles. Pour cela, des chercheur-e-s toulousain-e-s s'appuient sur l'ingénierie dirigée par les modèles et sur les méthodes formelles. Ils définissent et utilisent des langages formels (rigueur proche des mathématiques) les plus appropriés pour la description des différents éléments (cahier des charges, architecture logicielle...), puis construisent, plus ou moins mécaniquement, des formes de preuve mathématique et enfin développent des outils de production automatique d'une partie des programmes et de leur documentation qui sont ensuite embarqués dans les systèmes de transport.

Sécurité informatique

Auparavant les véhicules contenaient peu de logiciels et étaient faiblement connectés, par conséquent les risques d'attaques étaient limités. Aujourd'hui, les systèmes informatiques sont très nombreux et disposent de multiples interfaces de communication. Ceci rend tout à fait plausible une attaque à distance sur les automobiles ou sur les avions. Des chercheur-e-s toulousain-e-s proposent des méthodes pour doter les systèmes informatiques embarqués dans les véhicules du futur de moyens de protection contre des attaques informatiques. Des travaux ont été menés pour l'avionique en collaboration avec le monde industriel, en réalisant systématiquement une analyse de vulnérabilités pendant le développement du système et non à la fin du développement, comme c'est aujourd'hui souvent le cas. Il s'agissait d'intégrer la cyber-sécurité au plus tôt dans le processus de développement et dans toutes les étapes du cycle de développement. Dans le domaine automobile, une méthodologie a été proposée pour détecter des intru-



Figure 2. Banc de contrôle permettant de superviser la conduite d'une voiture autonome* sur banc VILAD (« Vehicle in the Loop for Autonomous Driving »). ©J.-C. Moschetti/HEUDIASYC/ CNRS Photothèque

sions sur un véhicule, en analysant l'ensemble des communications du véhicule. À l'aide d'une spécification des différents calculateurs embarqués du véhicule, des chercheur-e-s ont pu détecter des intrusions complexes, c'est-à-dire, faisant intervenir la collaboration de plusieurs attaques élémentaires provenant de plusieurs calculateurs compromis. Enfin, les travaux les plus récents proposent une méthodologie permettant de détecter, en vol, une éventuelle attaque informatique qui serait perpétrée sur les calculateurs de vol. ❶

* Voir glossaire p.46



CONTRIBUTEURS

André Luc Beylot
et Rahim Kacimi

Institut de recherche en
informatique de Toulouse (IRIT –
CNRS ; Toulouse INP ; Université
Toulouse 1 Capitole ; Université
Toulouse – Jean Jaurès ; Université
Toulouse III – Paul Sabatier)

Xavier Roboam

Laboratoire plasma et conversion
d'énergie (LAPLACE – CNRS ;
Toulouse INP ; Université
Toulouse III – Paul Sabatier)

SMART GRID, des réseaux électriques intelligents

Avec l'arrivée massive des sources renouvelables intermittentes, les nouvelles technologies permettront d'ajuster la consommation et la production d'électricité et d'assurer la stabilité en fréquence et en tension du réseau à l'échelle de la milliseconde.

L'électricité, d'utilisation non polluante et de plus en plus renouvelable, est assurément LE vecteur énergétique du futur. Automobiles, trains, navires, ou avions plus électriques font partie, avec les réseaux électriques, du paysage du XXI^e siècle. Cet avenir amène de nouveaux enjeux tels que la mise en cohérence d'énergies mixtes souvent intermittentes (éolien, solaire, hydraulique...) et une demande croissante des consommateurs. Dans ce contexte, il faut équilibrer production et consommation, ajuster/optimiser les flux d'énergie et assurer la stabilité en fréquence et en tension du réseau

à l'échelle de la milliseconde. L'automatisation de ces processus complexes repose sur le croisement de différentes disciplines et technologies alliant énergie et communication. Les aspects communicationnels contribuent en effet à l'essor des smart grids*. Ils s'avèrent utiles tant pour les problématiques de transition énergétique que de mobilité innovante.

Les TIC pour améliorer la condition de vie

Les smart grids constituent un environnement de réseaux de communications hétérogènes dans lequel une riche variété de Technologies de l'information et de la communication coexistent

(TIC). Les TIC apportent des outils performants permettant une meilleure gestion et une évaluation des sources de surconsommation d'énergie. À travers son domaine d'application stratégique sur la ville intelligente, l'IRIT mène plusieurs travaux en lien avec la transition énergétique. L'objectif est d'améliorer la qualité de vie des citoyen·ne·s par la conception de services innovants tels que le pilotage des smart grids et la gestion de l'efficacité énergétique dans les bâtiments. D'autres travaux y sont menés dans le cadre de la mobilité innovante afin d'étudier la dynamique liée aux déplacements et activités urbaines et l'optimisation des communications et des flux (piétons, véhicules, fluides...). Deux projets illustrent ces défis : neOCampus (démonstrateur de campus innovant, connecté et durable) pour la diminution de l'empreinte écologique des bâti-

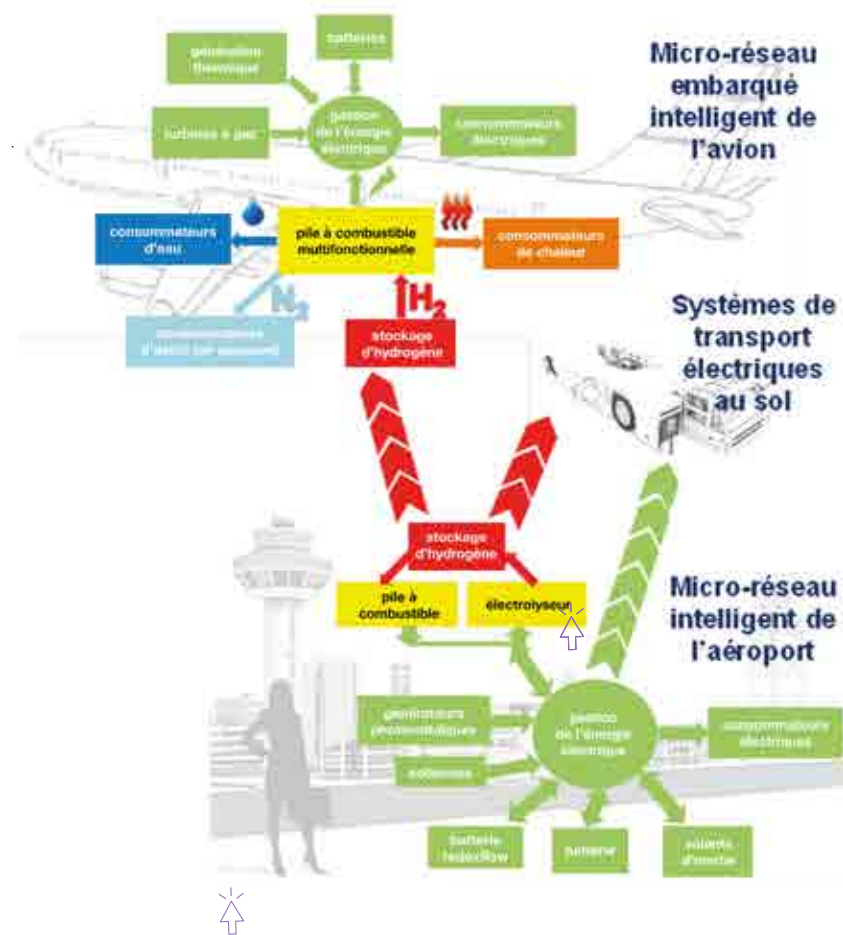


Figure 1. Représentation de Hyport. © C. Turpin/Laplace

ments et la maîtrise des coûts de fonctionnement ; et autOCampus faisant du campus un terrain expérimental du véhicule autonome*.

Des micros réseaux intelligents

Le LAPLACE, spécialisé dans la conversion d'énergie, se focalise notamment sur les « microréseaux intelligents », clusters énergétiques (habitat intelligent, sites isolés...) aussi autonomes que possible énergétiquement et participant activement à la stabilisation du réseau. Par exemple, dans le projet Hyport, il s'agit de bâtir l'infrastructure énergétique des futurs aéroports intégrant massivement des sources renouvelables couplées à un électrolyseur d'hydrogène constituant un hub énergétique capable, non seulement de stocker les surplus de production, d'alimenter des usages électriques et une flotte de véhicules de transport et de servitudes, sans oublier l'hydrogène pour les avions du futur. Ceci nécessite une gestion optimisée « multi flux » puisqu'il s'agit de gérer électricité, gaz (hydrogène) et chaleur : on parle alors de co-génération. La



Figure 2. « Prototype d'un compteur électrique communicant longue distance (Technologie LoRa) ». © C. Turpin/LAPLACE

conception intégrée (globale) de telles infrastructures intelligentes est un processus d'une grande complexité qui lève de nombreux verrous scientifiques et technologiques. ❶

*Voir glossaire p.46



L'objectif est d'améliorer la qualité de vie des citoyen·ne·s par la conception de services innovants

COMMENT RENDRE UNE MACHINE INTELLIGENTE ?

On apprend aujourd'hui aux machines à devenir intelligentes. Mais cela ne suffit pas, il faut aussi obtenir de ces machines intelligentes qu'elles ne soient pas discriminantes. Pour y parvenir, une équipe toulousaine développe une approche spécifique d'audit.



CONTRIBUTEURS

Aurélien Garivier

Institut des mathématiques
de Toulouse (IMT-CNRS ; Université
Toulouse 1 Capitole ; Université
Toulouse-Jean Jaurès ; INSA
Toulouse ; Université
Toulouse III-Paul Sabatier)

Edouard Pauwels

Institut de recherche en
informatique (IRIT-CNRS, Toulouse
INP ; Université Toulouse 1 Capitole ;
Université Toulouse – Jean Jaurès ;
Université
Toulouse III – Paul Sabatier)

Rien n'est plus bête qu'une machine : par construction, elle se borne à exécuter exactement ce qui lui est demandé. Comment la rendre intelligente ? Comment, par exemple, construire un véhicule autonome*, ou un ordinateur champion du monde de Go ? Pas question de lui dicter à l'avance ce qu'elle doit faire : son concepteur-riche ne sait même pas quelles situations elle va rencontrer, elle devra être conçue pour apprendre. C'est le cœur de l'activité d'AOC (Apprentis-

sage, optimisation, complexité), une équipe-projet rassemblant des chercheur·e·s des Instituts de Mathématiques et d'Informatique de Toulouse (IMT, IRIT, et du LAAS-CNRS).

Et l'apprentissage des machines, ça marche ! Si l'on désire par exemple (comme La Poste des années 1980) construire un programme informatique qui reconnaît les chiffres du code postal inscrits à la main sur les enveloppes, on peut, bien sûr, essayer d'écrire un programme reconnaissant, disons, l'image d'un 0 au fait qu'elle contient beaucoup de pixels sombres sur ses bords et

peu en son centre. Mais il est beaucoup plus efficace de ne pas du tout procéder comme ça ! Il n'est pas bien difficile pour La Poste de réunir un jeu d'entraînement de quelques dizaines de milliers d'images de chiffres, pour lesquels on sait ce qu'il faut reconnaître. Dès lors, ce dont on a besoin, c'est d'un programme capable de se nourrir de ces exemples pour trouver la meilleure règle associant un chiffre à une image. C'est l'objet de « l'apprentissage machine » (*machine learning**), un sujet de recherche en pleine expansion, au centre des préoccupations de l'équipe-projet AOC. Les problèmes ne manquent pas. Prenons, par exemple, un fil de discussion sur votre réseau social préféré : différent·e·s utilisateur·rice·s font des commentaires qui se répondent et se

croisent. Au sein d'AOC, on s'attelle à reconstruire automatiquement la structure du discours, c'est-à-dire l'enchaînement des interventions et leurs liens logiques (telle intervention répond à telle autre, tels utilisateur·rice·s s'opposent ou tombent d'accord, etc.). Pour cela, on combine des modèles linguistiques sophistiqués avec des algorithmes de machine learning nécessitant des techniques d'optimisation mathématique nouvelles et complexes.

Comment fonctionnent ces algorithmes ?

Les chercheur·e·s ont imaginé une multitude d'approches différentes, ayant chacune ses mérites. Certaines s'appuient sur des idées probabilistes très complexes, d'autres cherchent plutôt à copier la nature. À l'heure actuelle, la méthode la plus en vue est l'apprentissage profond, une version artificielle et caricaturalement simplifiée d'un cerveau. Pour la reconnaissance de code postal manuscrit, de faux neurones, connectés en entrée à l'image, se transmettent des informations et finissent par proposer d'y reconnaître un chiffre. On peut choisir l'importance des liens entre les neurones : le but est de régler

l'intensité des connexions pour réduire au maximum le nombre d'erreurs de reconnaissance sur le jeu d'entraînement. Pour effectuer ces réglages, les algorithmes font appel à la théorie mathématique de l'optimisation. C'est pour cela qu'AOC regroupe des spécialistes à la fois de probabilité, de statistique, d'optimisation mathématique, et de traitement du signal des images et du langage.

Une fois dotés d'une perception satisfaisante, comment faire apprendre aux ordinateurs un comportement autonome leur permettant d'accomplir un objectif comme par exemple conduire une voiture ? Là encore, on n'a rien trouvé de mieux que de copier la nature. C'est l'objectif de l'apprentissage par renforcement, autre champ de recherche de l'équipe-projet AOC : à chaque instant de son apprentissage, le véhicule choisit une action (tourner, freiner, etc.), dont les conséquences lui valent une récompense ou une punition virtuelle. Un bon algorithme va garantir qu'il obtiendra le plus de récompenses possible, et donc qu'il optimisera sa conduite en toutes circonstances. Mais tout ça n'est-il pas inquiétant au final ? Si ces algorithmes sont puissants, et si on leur confie le pouvoir d'agir sur la vie de tout un

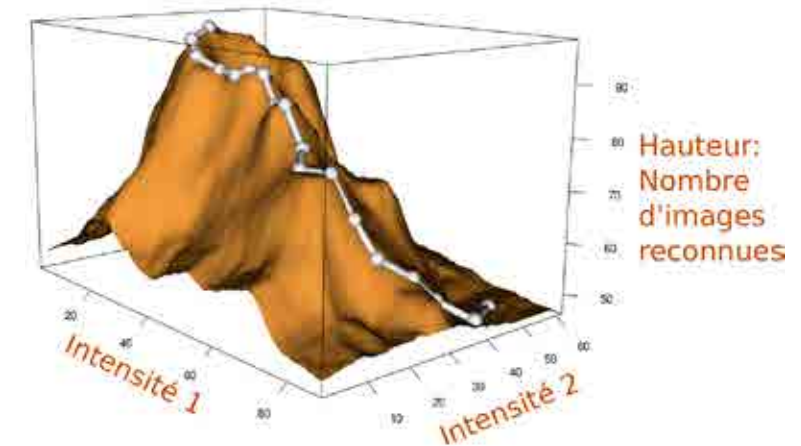


Figure 1. Illustration d'une méthode itérative pour l'optimisation en apprentissage. Les axes horizontaux représentent les intensités de deux connexions entre neurones. Pour chaque valeur de ces intensités, on peut estimer la proportion d'images correctement reconnues par le modèle : c'est ce que représente la montagne. On cherche à régler les connexions pour que cette proportion soit maximale : on cherche donc le point culminant de la montagne, l'optimum. Les algorithmes de recherche locale vont explorer ce paysage en partant d'un point initial, puis en faisant de petits déplacements dans des directions de forte pente : c'est le chemin en blanc.
© Aurélien Garivier/IMT, Edouard Pauwels/IRIT

chacun, ne doit-on pas s'inquiéter des dangers que cela peut représenter ? Il est clair que l'apprentissage de demain devra donner des garanties, notamment en matière de justice et d'éthique. Consciente de cet enjeu, l'équipe AOC travaille sur ces sujets : elle développe une approche spécifique d'audit pour les algorithmes de décision automatisés, afin d'être en mesure de certifier qu'ils n'induisent pas de biais ou de discriminations inacceptables. Pour ce faire, elle s'appuie sur les travaux les plus récents en probabilité et en statistique : beaucoup reste à faire pour permettre une utilisation robuste et raisonnée de ces méthodes.

* Voir glossaire p.46

“ S'assurer que les algorithmes de décision automatique n'induisent pas de biais ou de discriminations injustes ”

L'AIDE À LA DÉCISION, pour un meilleur compromis décideur-machine

Comment permettre à un décideur de prendre la décision la mieux appropriée à ses besoins ? L'Institut de recherche en informatique de Toulouse (IRIT) développe des Systèmes interactifs multicritères d'aide à la décision (SIAD).



**CONTRIBUTRICE
CONTRIBUTEUR**

**Pascale Zaraté
et Guy Camilleri**
*Institut de recherche en
informatique de Toulouse (IRIT –
CNRS ; Toulouse INP ; Université
Toulouse 1 Capitole ; Université
Toulouse – Jean Jaurès ; Université
Toulouse III – Paul Sabatier)*

L'aide à la décision est un ensemble de méthodes et de techniques. Utilisée dans différents domaines tels que la finance, la gestion, la médecine, les transports, elle a pour objectif final d'assister une personne ou autre entité confrontée à des problèmes de décision en lui donnant les informations pertinentes pour qu'elle puisse les comprendre. Il ne s'agit pas de prendre la décision à la place du décideur mais bien de donner des éléments de solution afin qu'il puisse prendre la décision la plus appropriée selon ses propres critères.

Un espace de recherche se situe dans le domaine de l'Intelligence artificielle* où une machine (logiciel) tente de reproduire le raisonnement, relatif à un problème spécifique, d'un

humain. Afin d'apporter la meilleure aide possible à un décideur, une équipe de l'IRIT développe des Systèmes interactifs d'aide à la décision (SIAD) où sont considérées des successions d'allers/retours entre le décideur et la machine.

Aide à la recommandation

Par ailleurs, l'approche se veut multicritères, c'est-à-dire qu'elle vise à trouver un compromis entre plusieurs objectifs. Par exemple, lors de l'achat d'un véhicule une personne peut chercher à minimiser le prix tout en souhaitant une vitesse de pointe très élevée ainsi qu'un indice

de coût kilométrique minimal. En aide à la décision multicritères les chercheur-e-s mettent au point des modèles mathématiques permettant de prendre en considération tous les critères ou objectifs et de trouver le meilleur compromis entre ces critères.

Une situation plus complexe, consiste à développer des systèmes (SIAD) où les interactions ne se limitent pas à un individu mais à un groupe de décideurs. Si on suit l'exemple de l'achat du véhicule, on peut par exemple demander à chaque utilisateur-riche de saisir via une interface ses préférences (Figure 1). Le logiciel nommé ici

“ Développer des systèmes où les interactions ne se limitent pas à un individu mais à un groupe de décideurs

Vote

Note : veuillez introduire les performances des alternatives enregistrées sur chaque critère

Alternatives	Prix	Indice coût kilométrique	Vitesse de pointe
Véhicule 1	Moyen	Moyen	Bon
Véhicule 2	Bon	Bon	Moyen

Poids et fonction de préférence

Note : veuillez introduire le poids et les paramètres de la fonction de préférence pour chaque critère

Critère	Poids	Minimum	Désiné(e)	Maximum
Prix	Moyennement important	Peu important	Peu important	Assez important
Indice coût kilométrique	Peu important	Peu important	Peu important	Assez important
Vitesse de pointe	Votez	Peu important	Peu important	Assez important

GRUS ou GRoUp Support intègre ces données pour chacun et les modèles mathématiques associés permettent de présenter une ou des solutions optimisées à l'échelle du groupe. La recherche actuelle tente d'aller encore plus loin en proposant une aide à la recommandation. Les systèmes de recommandation sont une forme spécifique d'aide à la décision

qui filtrent l'information visant à présenter les éléments d'information (films, musique, livres, pages Web, modèles de voiture, etc.) susceptibles d'intéresser l'utilisateur-riche. La difficulté pour le logiciel consiste à apprendre les préférences de l'utilisateur-riche, celles-ci pouvant être dynamiques c'est-à-dire évoluer au cours de la vie. Le domaine

du « Preference Learning » ainsi que le « Profiling » utilisateur-riche-s sont alors appréhendés. Ces systèmes pourraient par exemple intégrer des voitures intelligentes capables de guider un-e conducteur-riche en fonction de ses préférences de lieux ou conduite, préalablement introduites dans le système. 📌

* Voir glossaire p.46

 **Figure 1.** Interface graphique du système d'aide à la décision GRUS (GRoUp Support). © IRIT



Vers l'acceptabilité de l'autonomie des SYSTÈMES DE CONDUITE



CONTRIBUTRICES

Valérie Camps, Stéphanie Combettes et Elsy Kaddoum
Institut de recherche en informatique de Toulouse (IRIT – CNRS ; Toulouse INP ; Université Toulouse 1 Capitole ; Université Toulouse – Jean Jaurès ; Université Toulouse III – Paul Sabatier)

En appliquant aux véhicules autonomes connectés l'étude des phénomènes collectifs naturels, l'Institut de recherche en informatique de Toulouse (IRIT) vise à construire des systèmes qui interagissent afin de mieux appréhender leur autonomie.

Les travaux de l'équipe de l'IRIT s'inscrivent dans le domaine de l'Intelligence artificielle*. Ils puisent leur source dans les phénomènes collectifs observés dans les systèmes naturels (fourmilières, bancs de poissons, etc.), notamment au

travers des mécanismes d'émergence et d'auto-organisation qu'ils mettent en œuvre. Les entités naturelles qui composent ces systèmes n'ont pas réellement conscience d'œuvrer pour la survie d'un collectif ; elles agissent en fonction de ce qu'elles perçoivent localement dans leur environnement et interagissent

avec les congénères perçus par le biais d'actions coopératives. C'est dans le collectif et dans ces interactions coopératives que ces systèmes puisent leur force, résolvent des situations parfois difficiles et assurent ainsi leur survie.** L'équipe construit des systèmes artificiels composés d'un grand



Figure 1. Le comportement collectif des fourmis d'Argentine a servi d'inspiration au développement de techniques d'intelligence en essaim. © Guy Theraulaz/ CNRS Photothèque

nombre d'entités qui interagissent coopérativement et localement pour résoudre un problème posé, sans a priori sur la fonction collective à produire pour construire la solution. Cette approche originale, basée sur les systèmes multi-agents, permet de répartir dynamiquement les contraintes entre entités. Elle est particulièrement pertinente pour apporter des solutions à des problèmes pouvant être incomplètement décrits, n'admettant pas de solution algorithmique connue, évoluant dans un environnement dynamique, et s'adaptant continuellement à des situations ou événements imprévus.

Rassurer l'humain

Dans le cadre des véhicules autonomes* connectés, les travaux se situent à deux niveaux : (I) celui du véhicule autonome et (II) celui du collectif de véhicules autonomes. Un véhicule autonome évolue dans

un environnement peuplé de capteurs connectés. Ces capteurs fournissent des données représentant localement l'environnement du véhicule. Les systèmes ont pour rôle d'interpréter et gérer ces données afin de rassurer l'humain en l'informant de la situation courante.

Un collectif de véhicules se compose de véhicules autonomes ayant des caractéristiques (dont les capteurs) différentes. Dans les systèmes de l'équipe, chaque véhicule est vu comme une entité. Les chercheurs étudient comment chaque véhicule communique avec des entités voisines (et quelles informations il doit envoyer) mais aussi comment il réagit par rapport à l'information reçue de son voisinage afin de maximiser sa propre sécurité et celle du collectif.

Par exemple, un véhicule autonome va automatiquement avertir les véhicules qui le suivent de la présence d'un obstacle sur la route. Ces derniers vont donc adapter leur conduite (ralentir par exemple) et éventuellement modifier leur itinéraire évitant ainsi un engorge-



ment. À ce jour, accepter que des véhicules soient autonomes et cohabitent avec des véhicules non-autonomes est un problème sociétal important. Ces travaux visent à améliorer la confiance envers ces systèmes autonomes afin de favoriser leur acceptabilité à plus long terme. Ces systèmes permettront notamment de fluidifier la circulation et d'augmenter la sécurité routière.

* Voir glossaire p.46

€* Voir *Petit Illustré Systèmes Complexes*, p.16.



Figure 2. À l'intérieur du véhicule EZ10 (100% électrique), un écran tactile permet à l'utilisateur de sélectionner sa destination et de suivre le trajet emprunté par le véhicule. © Cyril Fresillon/ Institut Pascal/CNRS Photothèque



Accepter que des véhicules autonomes et non-autonomes cohabitent est un problème sociétal important

VIVRE AVEC LA VOITURE DU FUTUR



CONTRIBUTRICE CONTRIBUTEUR

Céline Lemercier

Pierre Vincent Paubel

laboratoire Cognition, langues,
langage, ergonomie (CLLE – CNRS ;
Université Toulouse – Jean Jaurès)

Du simulateur de conduite aux entretiens, plusieurs scénarios permettent aux chercheur-e-s du laboratoire Cognition, langues, langage, ergonomie (CLLE) d'identifier les futurs comportements des individus transportés en véhicules autonomes.



Figure 1. Simulateur de conduite de la plateforme Cognition, comportements et usages (CCU).
© F. Maligne/MSH Toulouse/CNRS Photothèque



Demain, des systèmes intelligents partageront avec l'humain l'activité de conduite. Il est donc essentiel de penser, dès à

présent, à l'interaction de ce système avec les usager-e-s afin qu'il s'adapte au mieux aux attentes, besoins, et contraintes de son utilisateur-ric-e. À cette fin, le-la scientifique en ergonomie cognitive développe des protocoles scientifiques et utilise pour se faire une boîte à outils méthodologiques et de mesure.

Différentes démarches sont mises en œuvre pour évaluer l'interaction de l'humain avec la voiture autonome* : questionnaires/entretiens individuels ou en groupe, scénarios de conduite sur route réelle ou sur simulateur de conduite (permettant de tester des systèmes en maturation). Tous les individus étant soumis exactement au même scénario, on peut alors analyser l'effet des situations de conduite manipulées sur des mesures résumées du

comportement (basé sur le traitement des données de tous les participant-e-s).

Plusieurs scénarios testés

Un simulateur de conduite est constitué à minima d'un volant, d'un écran et d'un logiciel de simulation. Au laboratoire CLLE, les chercheur-e-s interrogent l'effet de la conduite en mode autonome sur le comportement du conducteur-ric-e. Pour ce faire, ils élaborent des scénarios dans lesquels des variables d'intérêt sont manipulées afin de tester leurs hypothèses. Par exemple, un scénario, testera l'effet de la durée de la phase de conduite en mode autonome (30 minutes vs 75 minutes) sur la qualité de la reprise en main du volant par le conducteur-ric-e, ou bien encore l'effet des conditions climatiques (beau temps vs. brouillard) sur ce même comportement. Chaque scénario fait l'objet d'un recueil auprès de participant-e-s volontaires. Durant la phase de conduite expérimentale, sont enre-

gistrés les paramètres véhicules de positionnement longitudinal (vitesse entre autres) et latéral (dans la voie de conduite), ainsi que les données comportementales et physiologiques des conducteur-ric-e-s. Ces mesures objectives pourront être complétées par des données subjectives issues d'entretiens ou de questionnaires. Les mesures comportementales sont la qualité (correcte/incorrecte) et le temps de réponse d'un individu à un événement particulier. Par exemple, on peut demander au conducteur-ric-e s'il-elle a vu l'obstacle présent sur la route. Les mesures physiologiques sont issues de l'utilisation d'outils tels que l'électroencéphalogramme (EEG), l'électrocardiogramme (ECG), l'enregistrement de la réponse électrodermale (EDA), ou encore la mesure fine du mouvement des yeux et de la dilatation pupillaire. *In fine*, la combinaison de l'ensemble de ces mesures permet d'évaluer finement l'état émotionnel et attentionnel du conducteur-ric-e. 📌

* Voir glossaire p.46



Les mesures comportementales sont la qualité et le temps de réponse d'un individu à un événement particulier



CONTRIBUTEUR

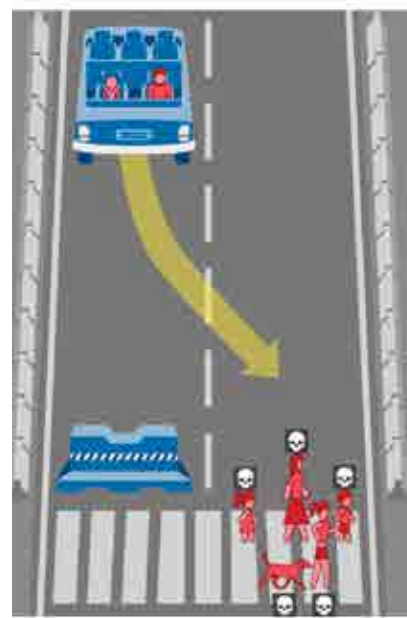
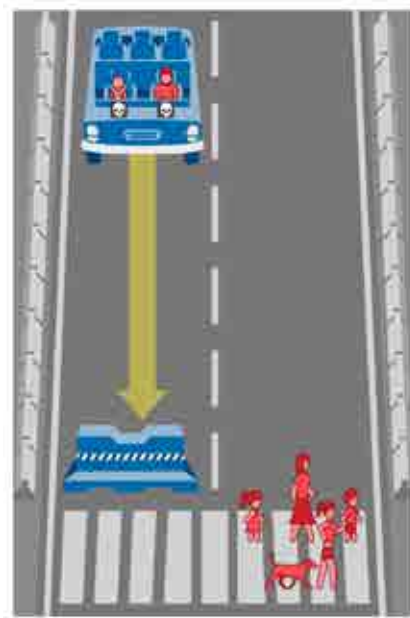
Jean-François Bonnefon,
Toulouse School of Management
Research (TSM-R-CNRS ; Université
Toulouse 1 Capitole ; TSE-R/IAST).

QUELLE MORALE pour les voitures sans conducteur·trice ?

Les robots ne devraient pas pouvoir tuer des humains, et pourtant les voitures sans conducteur·trice devront parfois choisir qui va vivre et qui va mourir dans un accident. Comment les programmer sans plonger dans nos propres contradictions morales ?



Figure 1. Une voiture sans conducteur·trice fait face à un choix difficile : sauver les piéton·ne·s ou bien ses propres passager·ère·s ? © Lyad Rahwan



L'avènement des voitures sans conducteur·trice nous promet un trafic plus fluide, moins polluant, et surtout moins dangereux. En effet, selon certaines estimations, jusqu'à neuf accidents sur dix sont le résultat d'une erreur humaine. Dans la mesure où une voiture sans conducteur·trice ne se fatigue pas, n'est pas distraite, et respecte scrupuleusement le code de la route, on peut penser qu'elle évitera la plupart de ces accidents. Certains accidents, pourtant, ne pourront pas être évités, et la voiture autonome* pourra avoir à faire des choix très difficiles. Par exemple, que faire dans une situation où la voiture doit choisir entre écraser un groupe de piétons ou sacrifier la vie de ses passager·ère·s pour les éviter ?

Une décision programmée

Les humains n'ont pas à se poser ce genre de question, car lorsque les choses se passent en une fraction de seconde, ils



Sommes-nous prêts à monter dans une voiture programmée pour nous tuer pour sauver davantage de vies ?

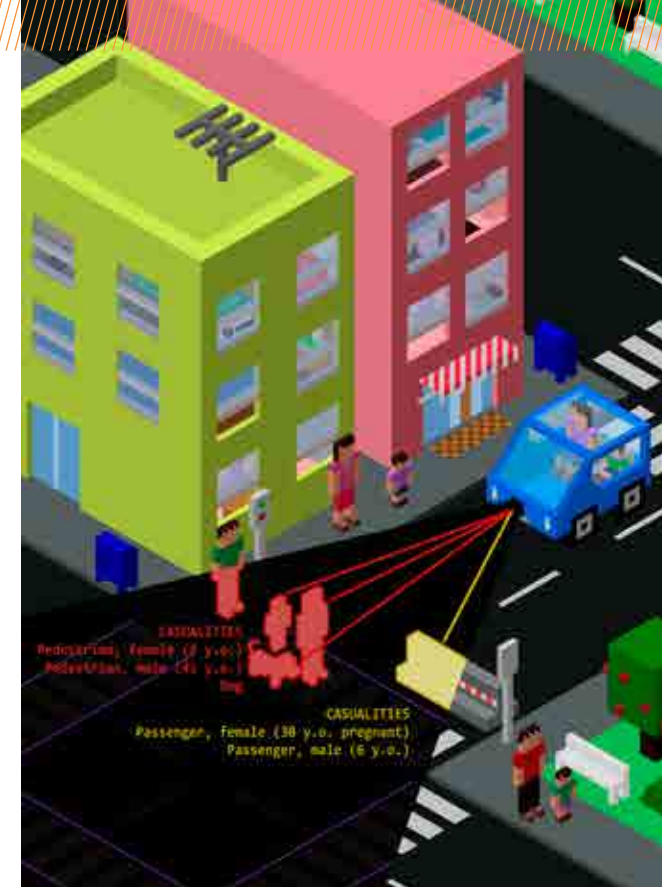
prennent une décision instinctive, sans avoir le temps d'y réfléchir. Et il ne sert à rien pour ce conducteur·rice de décider à l'avance de ce qu'il fera dans une telle situation, car rien ne garantit que sa décision instinctive puisse être « programmée » à l'avance. Mais les voitures sans conducteur·trice, elles, peuvent et doivent être programmées à l'avance. Alors, sommes-nous prêt·e·s à monter dans une voiture programmée pour nous tuer quand notre sacrifice peut sauver les autres, même s'il n'y a qu'une chance minuscule que cette situation se produise ?

Un dilemme moral

Pour répondre à cette question, les scientifiques mènent des enquêtes comme celles auxquelles il est possible de répondre en se connectant au site moralmachine.mit.edu. Et les résultats sont parfois surprenants. Par exemple, plus de 75% des Américain·e·s qui ont été interrogé·e·s par l'équipe toulousaine sont moralement et fortement convaincu·e·s que la voiture devrait sauver le plus de vies



Figure 2. Le site moralmachine.mit.edu permet à chacun·e de dire ce qu'une voiture sans conducteur·trice devrait faire en cas de choix moral difficile. Plus de trois millions de personnes se sont déjà exprimées, sur près de 30 millions de scénarios. © Lyad Rahwan



possibles, même si cela demande de sacrifier ses passager·ère·s. Mais, quand on leur demande quelle voiture ils-elles préféreraient acheter, leur choix se porte sur une voiture qui protège ses passager·ère·s dans tous les cas ! Cela montre la difficulté à concilier le meilleur choix pour la société et leur intérêt propre. Dans ce cas, on attend souvent des gouvernements qu'ils décident pour les citoyen·ne·s, en produisant des lois. Mais il sera extrêmement difficile de trou-

ver les bonnes lois quand la question est de décider qui une voiture a le droit de tuer, et encore plus de promulguer des lois qui, par exemple, puissent être acceptées dans tous les pays de l'Union Européenne, où les populations peuvent avoir des idées différentes de ce qui est moralement acceptable. Les recherches consistent à rendre ce travail plus facile en mesurant ce que les citoyen·ne·s sont prêt·e·s à accepter. ❶

* Voir glossaire p.46



CONTRIBUTRICE

Anne Condamines

laboratoire Cognition, langues, langage, ergonomie (CLLE - CNRS ; Université Toulouse - Jean Jaurès)

AVIATION, ESPACE ET LINGUISTIQUE

Une même phrase peut être entendue de plusieurs manières, ce qui pourrait, en cas d'urgence, être source de danger. Le laboratoire Cognition, langues, langage, ergonomie (CLLE) travaille à l'élaboration de langues contrôlées monosémiques.



Figure 1. Utilisation d'un oculomètre.
© P.Dumas/CERCO



La linguistique a un rôle important à jouer dans l'aéronautique du futur, la langue naturelle ne transmettant pas toujours très bien les informations. Les mots et les phrases peuvent, en effet, avoir plusieurs sens ou être vagues. Par exemple, « Paul a vu un satellite du CNES » peut vouloir dire : soit « Paul était au CNES et il a vu un satellite », soit « Paul a vu un satellite qui appartient au CNES ». Ce type d'ambiguïtés est fréquent et ne pose en général pas de problème majeur au quotidien. La communication devient cependant cruciale si des vies humaines ou des sommes d'argent conséquentes sont en jeu comme dans l'aéronautique ou le spatial.

Au début des années 1970, aux USA, des ingénieur-e-s et des expert-e-s ont proposé de définir une « langue contrôlée » pour imposer des mots ou des structures langagières et en interdire d'autres. La communication entre pilotes et contrôleur-e-s aérien-ne-s, en particulier au décollage et à l'atterrissage, et l'affichage des messages d'alarme dans les

cockpits d'avions constituent deux exemples d'utilisation des langues contrôlées dans l'aéronautique et l'aviation. Le tableau (Figure 2) illustre la phraséologie telle que définie par l'Organisation internationale de l'aviation civile. La photo, (Figure 3), montre un exemple de message d'alarme affiché dans la partie des cockpits d'Airbus appelée ECAM (Electronic Centralised Aircraft Monitor).

Une langue contrôlée

Dans le laboratoire Cognition, langues, langage, ergonomie (CLLE), les scientifiques mettent en place trois méthodes pour évaluer et/ou construire des langues contrôlées : 1. Demander aux locuteur-trice-s expert-e-s du domaine (pilotes, contrôleureuse-s de l'aéronautique, ingénieur-e-s, etc.) quelle forme linguistique leur semble la plus efficace entre plusieurs proposées. La plus fréquemment citée est alors retenue. Une thèse en cours avec le CNES explore cette méthode pour définir une langue contrôlée. 2. Proposer aléatoirement une des différentes phrases possibles pour un même message, suivie d'une photo. Les sujets doivent dire si, oui

Pilote : Saint-Ex Prévol, Citro Air 32 45, demandons paramètres pour le départ

Contrôleur : Citron Air 32 45, piste 36 droite, vent 240 degrés 10 nœuds, visibilité 5 kilomètres, température 16, point de rosée 14, QNH 1020, QFE 1009, niveau de transition 50, il est 10 heures 22

Pilote : Piste 36 droite, QNH 1020, Citron Air 32 45



Figure 2. Exemple d'un échange entre un pilote et un contrôleur utilisant la phraséologie française (langue contrôlée de l'aviation civile).
© A. Condamines/CLLE



Figure 3. Partie de l'ECAM (Electronic centralised aircraft monitor) sur laquelle s'affichent les messages d'alarme dans les cockpits d'Airbus.
© Agnès Voyant



La forme linguistique la plus fréquemment citée est alors retenue comme étant la plus efficace

ou non, la photo représente la phrase proposée. Le test porte sur la rapidité avec laquelle les sujets identifient les bonnes représentations. Par exemple, hors contexte, une phrase comme « ouverture porte » peut signifier : « la porte s'ouvre » ou bien « ouvrez la porte ». Du fait du manque d'éléments ou d'une organi-

sation grammaticale différente, le temps de compréhension est souvent augmenté pour les phrases brèves.

3. Recourir à l'oculométrie. Cela consiste à mesurer le temps de fixation ou le parcours des yeux d'un sujet au moment de la lecture. Ces éléments sont autant d'indices d'une « charge mentale augmentée ». On peut considérer que si un-e lecteur-ric-e s'attarde sur des portions de texte ou revient dessus, c'est parce qu'il ou elle ne les comprend pas immédiatement. Des éléments non maîtrisables peuvent perturber la communication : stress, charge mentale importante, sollicitations, intentions des locuteur-trice-s... La marge d'amélioration des langues contrôlées sera donc un défi pour les linguistes dans les années à venir. ❶

PERCEVOIR LES SONS

Une approche du confort acoustique humain



CONTRIBUTRICE CONTRIBUTEURS

Julien Tardieu
Cynthia Magnen

Maison des sciences de l'Homme
et de la société de Toulouse
(MSHS - T-CNRS ;
Université de Toulouse)

Pascal Gaillard

laboratoire Cognition, langues,
langage, ergonomie (CLLE - CNRS ;
Université Toulouse - Jean Jaurès)

Le seul signal acoustique n'est pas suffisant pour imaginer le confort sonore dans les transports du futur. Les études actuelles tendent aussi à évaluer les facteurs humains qui influencent la perception par chacun d'un signal acoustique.

Afin de maîtriser le confort acoustique pour les utilisateur-ric-e-s des nouveaux moyens de transport, leur conception devra considérer la perception auditive du point de vue des facteurs humains et pas simplement du signal acoustique. En effet, qu'il s'agisse d'améliorer la qualité sonore dans une automobile, de réduire la gêne sonore pour les riverain-e-s d'une route ou

d'un aéroport, ou de créer des sons pour faciliter l'interaction avec un ordinateur de bord, il est indispensable de comprendre comment les sons sont perçus. La perception auditive est une activité quotidienne qui nous permet de comprendre et d'interagir avec notre environnement. En ce sens, il convient de faire une distinction entre les capacités physiologiques de l'oreille permettant de capter les sons, et les processus cognitifs mis en œuvre dans le cerveau

pour les comprendre et les interpréter. Le bruit d'un scooter, qui est a priori considéré comme un son désagréable, illustre à quel point la perception d'un son dépend de sa représentation en mémoire ainsi que des contextes de réception du son. En effet, imaginez à présent que ce même scooter est celui de votre adolescent-e parti-e en soirée et dont vous attendez le retour inquiet-e... Ainsi, la notion de confort acoustique ne peut être appréhen-

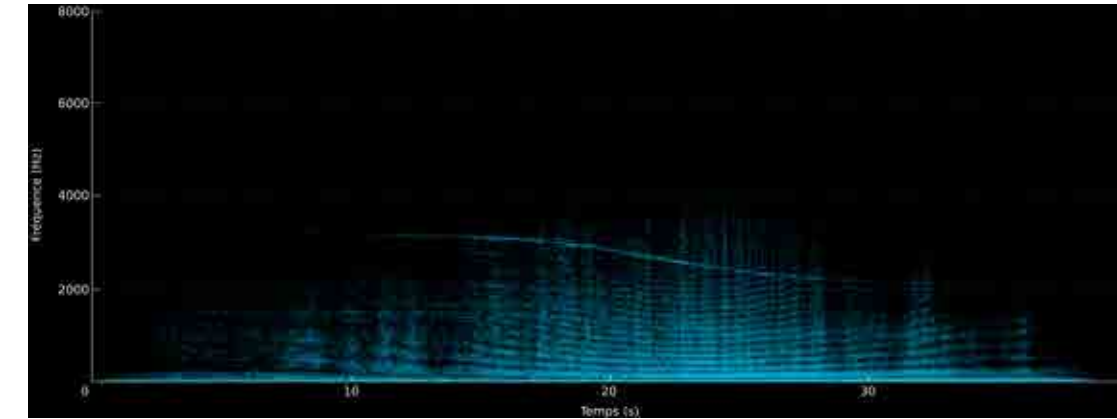


Figure 2. Représentation temps-fréquence (sonogramme) d'un bruit d'avion permettant d'observer les composantes acoustiques pouvant jouer un rôle dans la gêne sonore chez les riverain-e-s d'aéroports.
© Julien Tardieu/ MSHS-T



La notion de confort acoustique ne peut être appréhendée que si l'on tient compte des différentes interactions entre les signaux acoustiques et les situations dans lesquelles les sons sont perçus

dée pleinement que si l'on tient compte des différentes interactions entre les signaux acoustiques, les connaissances propres aux personnes, et les situations dans lesquelles les sons sont perçus. Dans le domaine de l'aéronautique par exemple, de nombreux travaux ont permis d'identifier les caractéristiques acoustiques du bruit d'avion sur lesquelles le constructeur pouvait intervenir pour réduire la gêne chez les riverain-e-s d'un aéroport. Cependant, plusieurs campagnes d'enquêtes portant sur des aspects plus psychologiques de la gêne, montrent que le bruit d'avion est

aussi perçu en fonction des représentations que chaque personne a de l'avion. Se pose alors la question de comment évaluer finement ces facteurs humains en laboratoire, et en interaction avec les facteurs acoustiques. En menant des entretiens guidés auprès d'un panel important de personnes, il est possible d'identifier précisément tout ce à quoi différents types de bruits d'avion renvoient et, le cas échéant, les représentations négatives associées (ex : peur de l'avion) qui peuvent conduire à une gêne même si le son n'est pas gênant du seul point de vue du signal acoustique. De même,

des études comportementales mettant des participant-e-s en situation d'activité proche d'une activité quotidienne (ex : jeu de mémoire) permettent de mesurer comment différents types de bruit d'avion peuvent influencer les performances à différentes tâches, mettant alors en évidence les aspects attentionnels liés à la gêne sonore. Ainsi, pour apporter des solutions complètes et mieux adaptées à la problématique du confort acoustique dans les transports du futur, les recherches intègrent nécessairement les facteurs humains aux résultats issus des approches centrées sur le signal acoustique. ●



Figure 1. Plateau d'études techniques et de recherches en audition (PETRA). Cet équipement permet de mener des recherches sur la perception des sons dans une approche écologique et centrée sur les facteurs humains.
© C. Magnen/MSHS-T



LA VILLE CONNECTÉE



CONTRIBUTEUR

Emmanuel EVENO

Laboratoire interdisciplinaire
solidarités, sociétés, territoires
(LISST – CNRS ; EHESS ; ENSFEA ;
Université Toulouse – Jean Jaurès)

Internet, loin d'avoir favorisé l'aménagement du territoire a renforcé la concentration urbaine. Réel outil de démocratie locale ou levier marchand ? Le Laboratoire interdisciplinaire solidarités, sociétés, territoires (LISST) s'intéresse au fonctionnement des villes connectées dans le monde.

Pour gérer la distance dans l'espace physique, l'humanité n'a jamais mis en œuvre que trois types de modalités, mises en lumière par

le géographe Jacques Lévy¹ :

- Se déplacer dans l'espace
- Communiquer à distance
- Se regrouper, faire agglomération, faire ville.

À l'époque contemporaine, cette troisième modalité, celle qui renvoie à la ville, prend une dimension nouvelle dans la mesure où on assiste à une tendance mondiale vers « l'urbain généralisé ». Avec ce qu'on a appelé la « *transition numérique* », on a pu croire un temps que la modalité « communication à distance » allait permettre de désengorger les villes, voire autoriser un retour vers les espaces ruraux. Comme si, pour faire société et donc lutter contre la distance, il

devenait moins important d'être en ville. Cette hypothèse s'est en fait assez vite révélée fausse. Ce qui se passe, c'est que les technologies numériques sont pleinement associées au renforcement du processus d'attraction urbaine.

La ville devient la « *ville connectée* ». Certes, le téléphone portable, Inter-

net, les outils de géolocalisation sont utiles en dehors des contextes urbains, mais le creuset fondamental des usages sur lequel s'appuient ces dispositifs sociotechniques, c'est bien celui de la ville et en particulier de la grande ville. La « *ville connectée* », c'est donc une grande ville dans laquelle les technologies

numériques ont acquis une place importante, que ce soit dans le gouvernement de la ville, dans son économie mais aussi dans les pratiques sociales de ses habitants.

L'équipe de chercheur-e-s du LISST s'intéresse au fonctionnement de ces villes connectées pour mieux comprendre le fonctionnement de ces espaces et aider les pouvoirs publics à la diffusion de bonnes pratiques en leur sein. Il s'agit d'étudier des villes très densément peuplées ou particulièrement complexes du fait de divers facteurs (insécurité, très grande pauvreté, pays en guerre...). Ce type de contextes est particulièrement propice au développement des technologies numériques comme recours contre les tendances au chaos et à l'entropie.



Les chercheur-e-s s'intéressent au fonctionnement des villes connectées pour aider les pouvoirs publics à la diffusion de bonnes pratiques en leur sein

Pour étudier cette complexité, les chercheur-e-s travaillent notamment sur la ville de Medellin en Colombie comme « cas pratique ». Ils réalisent actuellement, en collaboration avec l'université nationale de Colombie (Escuela del Habitat) des campagnes de questionnaires sur les pratiques numériques des habitants, accompagnées d'enquêtes pour recueillir des récits de vie. Les chercheur-e-s s'intéressent également à de nombreux autres cas, en France et en Europe : Lyon,

Toulouse, Hambourg, Sheffield, Utrecht...

Une des spécificités des savoir-faire français dans ces arrangements urbains qui constituent la « *ville connectée* », reste le rôle fondamental des services publics comme facteur d'inclusion sociale, tandis que dans de nombreuses autres villes du monde, la ville connectée est avant tout organisée autour d'une panoplie de services marchands. ❶

1 - Jacques Lévy, *Le tournant géographique*, Ed. Belin, 1999.



Figure 1. La ville de Medellin, en Colombie, est l'objet d'étude des chercheur-e-s toulousain-e-s, en collaboration avec l'université nationale de Colombie, sur les pratiques numériques des habitant-e-s.

© E. Eveno/LISST



LES NOUVELLES TECHNOLOGIES pour les personnes déficientes visuelles

Le vieillissement global de la population entraîne l'augmentation du nombre des déficients visuels pour lesquels les questions liées à la mobilité urbaine sont des enjeux sociétaux. L'Institut de recherche en informatique de Toulouse (IRIT) développe de nouveaux outils performants.



CONTRIBUTEURS

Bernard Oriola
Marc Macé

Institut de recherche en
informatique de Toulouse
(IRIT-CNRS, Université
Toulouse 1 Capitole, Université
Toulouse Jean-Jaurès, Université
Toulouse-III-Paul Sabatier ;
Toulouse INP)

Les transports, et plus généralement les déplacements, représentent un enjeu majeur pour la population déficiente visuelle (DV). Cette population a vocation à croître du fait du vieillissement démographique et pourrait passer de 161 millions de personnes atteintes (dont un quart aveugles) en 1997, suivant l'OMS, à environ 600 millions de personnes (dont plus de 100 millions aveugles en 2050, suivant de récentes estimations. Une étude menée par l'Institut national canadien pour les aveugles, en 2003, a montré que près de la moitié des DV disent ne pas pouvoir accomplir seul-e-s toutes les activités de la vie quotidienne, et pour 26% d'entre eux-elles, ce sont la mobilité et les transports qui posent le plus de problèmes. Ainsi, la recherche et le développement de systèmes de

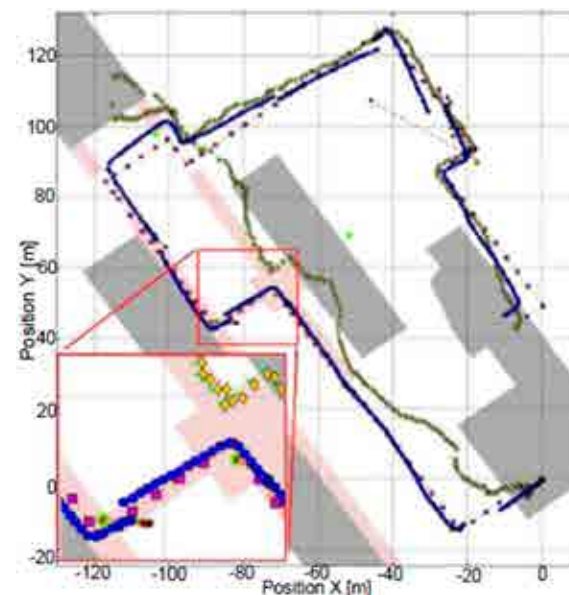


Figure 1. Sur ce trajet test à l'université Paul Sabatier, les bâtiments sont représentés en gris et les passages sous arches en rose. Le trajet prévu est indiqué en violet, la trace GPS en jaune et la position recalée grâce aux données de vision en bleu.

Une évaluation de ce dispositif à Toulouse dans le quartier des Carmes (Figure 2) a permis de valider les choix techniques. La généralisation de cette solution nécessite cependant des moyens importants, notamment pour constituer une base de données photographique de tous les lieux, sur le modèle de celle effectuée par Google dans Street View. Une telle base permettrait de disposer en tous lieux d'une ville, d'éléments visuels reconnaissables et géolocalisés. © B. Oriola/IRIT

AU SERVICE DE LA MOBILITÉ

suppléance en orientation et mobilité représentent des enjeux sociétaux et économiques importants. Dans les trois dernières décennies, le système GPS a suscité beaucoup d'attente, donnant espoir aux DV d'être guidé-e-s pas à pas jusqu'à une destination autrement qu'à l'aide d'un tiers ou chien guide. De nombreuses solutions de guidage adapté sont apparues mais restent assez peu utilisées.

Ces systèmes souffrent en effet des mêmes lacunes :

- Une précision optimale de l'ordre de 10 m insuffisante pour un piéton DV qu'un tel écart peut faire passer d'un passage piéton au centre d'un carrefour ; marge d'erreur amplifiée en ville du fait des obstacles entre le récepteur et les satellites.
- Un système d'information géographique (SIG) mal adapté : le mobilier urbain (feux, arrêts de bus, passages piéton...) n'est souvent pas pris en compte dans les itinéraires et le guidage.
- Une difficulté à déterminer la direction prise par le piéton : la position du récepteur est mise à jour toutes les secondes. Un piéton ne s'aperçoit de son erreur de trajet qu'au bout

de plusieurs secondes d'observation de sa position affichée sur la carte. - Des algorithmes de guidage inadaptés : un DV préférera plutôt un trajet moins dangereux avec par exemple un minimum de traversées de rues ou l'évitement de zones partagées ou de terrasses de café, qu'un choix entre trajet long ou court. Dans le cadre du projet NAVIG, à l'IRIT nous avons conçu un démonstrateur proposant une solution afin de pallier ces lacunes.

Tout d'abord NAVIG s'appuie sur un système d'information géographique et un algorithme de guidage adaptés aux besoins des DV. Ensuite, le positionnement est amélioré en couplant le GPS avec un système de vision par ordinateur chargé de repérer des cibles géolocalisées autour du piéton DV (Figure 2). Pour finir, les informations de guidage sont transmises de façon binaurale (simulation de sons 3D) au moyen d'un casque à

conduction osseuse afin de laisser libre les oreilles du DV. En parallèle, les améliorations des systèmes de positionnement par satellite (GPS et Galiléo), qui promettent d'offrir une précision métrique avec la prochaine génération de téléphones, pourrait enfin permettre une vraie appropriation des applications de guidage par les DV. ☛

Figure 2. Exemples de cibles visuelles géolocalisées dans un SIG adapté et détectées lors d'un déplacement en ville équipé du système NAVIG. © B. Oriola/IRIT



DES INFRASTRUCTURES EN DÉBAT

Dans nos sociétés développées, l'aménagement d'infrastructure est souvent source de conflits. Les chercheur·e·s du Laboratoire interdisciplinaire solidarités, sociétés, territoires (LISST) étudient la dimension technique des infrastructures de transport, tant sous l'angle des équilibres ou déséquilibres territoriaux qu'elles nourrissent, que de leur acceptabilité sociale.



CONTRIBUTEURS

Philippe Dugot

Jean-Pierre Wolff

Laboratoire interdisciplinaire
solidarités, sociétés, territoires
(LISST – CNRS ; EHESS ; ENSFEA ;
Université Toulouse – Jean Jaurès)

Transports de demain, comme transports d'aujourd'hui ou d'hier, s'appuient sur des infrastructures. Dans une société caractérisée par une aspiration à une mobilité croissante, transports et donc infrastructures, apparaissent comme un corrélat indispensable, érigé au rang de symbole d'une modernité sans cesse revisitée au gré des progrès techniques, signant la capacité des territoires à s'inscrire dans les flux d'échanges. Mais si les infrastructures de transport sont capitales et admirées pour les prouesses techniques qu'elles nécessitent, elles produisent des nuisances d'ordre environnemental, paysager et auditif. Elles sont fortement consommatrices d'espace, créent des coupures paysagères importantes et des ruptures

en matière de biodiversité. Ces éléments sont aujourd'hui à l'origine d'une conflictualité croissante de la part d'opposant·e·s de plus en plus organisé·e·s et informé·e·s, obligeant les aménageurs à une réflexion plus poussée sur l'intégration des infrastructures dans les territoires. Par contre, si cela ne débouche qu'assez rarement sur un abandon, les adaptations nécessaires s'ajoutent aux contraintes topographiques et de sécurité, produisant une inflation des coûts de construction. Les infrastructures sont alors celles qui expriment le mieux les paradoxes et contradictions

de nos sociétés développées. La mobilité y est d'un besoin inégalé, voire revendiquée comme un droit. Ainsi les territoires moins équipés, en ville comme à la campagne, crient à l'injustice ! Pour autant, les conséquences multi-formes induites sont de moins en moins acceptées et sont sources de débats et recours croissants.

Limiter les atteintes environnementales

Dans ce contexte des chercheur·e·s du LISST étudient la dimension technique des infrastructures de transport, tant sous l'angle des



On observe une opposition croissante d'opposants organisés et informés, aux nouvelles infrastructures liées aux transports

équilibres ou déséquilibres territoriaux qu'elles nourrissent, que de leur acceptabilité sociale. Cette réflexion est conduite à des échelles diverses, de l'insertion d'une station de tram dans son environnement urbain à des analyses d'impacts économiques et environnementaux à l'échelle régionale ou internationale. Elle s'inscrit dans une nécessaire pluralité des regards à la croisée de plusieurs disciplines (aménagement, géographie, économie, sociologie...) et selon des méthodes et outils divers (études de terrain, enquêtes, cartographie...). Cette démarche de recherche, et de formation est nécessaire pour que les projets d'aménagement s'intègrent au mieux aux nécessités territoriales tout en limitant au maximum les atteintes environnementales réelles ou redoutées par des populations de plus en plus vigilantes.

Complexité sociale

C'est la reconnaissance de cette nécessité qui valorise l'expertise des travaux effectués et des formations mises en place, positionnant chercheur·e·s, étudiant·e·s et

diplômé·e·s au cœur du triangle entre les porteur·euse·s de projets d'infrastructures, les différentes collectivités touchées et la population via, souvent, le canal associatif. Ainsi, il serait souhaitable que les chercheur·e·s soient impliqué·e·s dans une réflexion sur le projet d'Hyperloop, qui nécessitera des infrastructures très lourdes. Outre son coût, l'acceptabilité d'une nouvelle empreinte infrastructurelle dans le paysage ne manquera pas de renforcer les débats déjà existants. Ce n'est sans doute pas le moindre des défis pour cette infrastructure comme pour d'autres. Il faut penser des cadres et former des personnes pour intégrer cette complexité sociale. ●



Figure 2.
Artificialisation des sols et coupures paysagères.
© CNRS

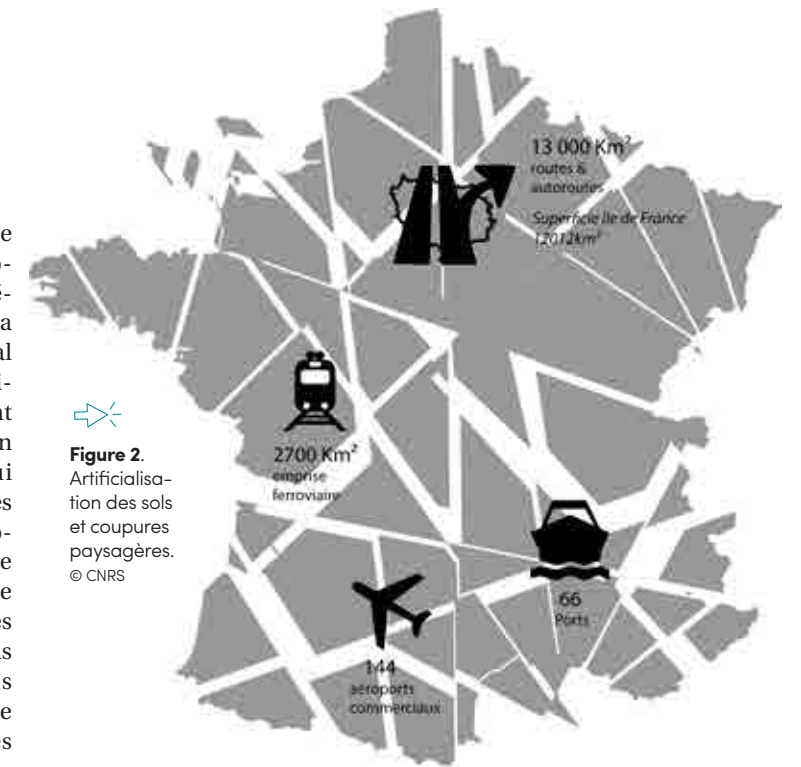


Figure 1. Ligne à grande vitesse © Jean-Pierre Wolff/LISST



GLOSSAIRE



Algorithme

Un algorithme est une procédure spécifiant sans ambiguïté une séquence d'opérations à exécuter par un système pour la réalisation d'une tâche donnée.

Autonome

Capacité, pour une machine dotée d'Intelligence artificielle, d'atteindre un objectif sans intervention humaine. Mais cet objectif a été préalablement fixé par un humain-programmeur et la machine ne dispose d'aucune volonté propre.
source : définition citée dans CNRS Le Journal, <https://lejournel.cnr.fr/billets/voitures-autonomes-par-quoi-serez-vous-choques>

Intelligence artificielle

L'Intelligence artificielle (IA) est un ensemble de théories et de méthodes visant à doter les ordinateurs de capacités d'apprentissage et de raisonnement, dans le but de résoudre

des problèmes de façon autonome ou bien de permettre à des machines d'adopter un comportement comparable à un être vivant.

Machine Learning

L'apprentissage machine ou machine learning est une classe d'algorithmes d'apprentissage automatique, à partir de données, sans production explicite de règles. C'est pourquoi on les qualifie souvent de « boîte noire » : la raison pour laquelle l'algorithme parvient au résultat est inconnue.

source : définition citée dans CNRS Le Journal, <https://lejournel.cnr.fr/articles/peut-faire-confiance-a-lintelligence-artificielle>

Plasma

Le plasma ne désigne pas une substance particulière mais un quatrième état de la matière, au même titre que les états solides,

liquides et gazeux. Un gaz devient un plasma lorsqu'on lui apporte une quantité d'énergie suffisante pour arracher les électrons de ses atomes et l'ioniser ; il forme alors une « soupe » électron-ion capable de conduire l'électricité. Les étoiles sont, par exemple, essentiellement constituées de plasmas, de même que la foudre.

Ils sont utilisés dans un grand nombre d'applications comme le traitement de surface (par exemple, dépôt de couches minces et gravure en microélectronique).

Smart grids

La notion de « smart grids » (réseaux électriques intelligents) est marquée par l'idée d'intégrer infrastructure électrique (énergie) et intelligence embarquée avec des Technologies d'information et de communication fiables pour favoriser la pénétration de sources renouvelables intermittentes et optimiser la consommation.

LABORATOIRE D'EXCELLENCE CIMI



Le Labex Centre international de mathématiques et d'informatique (CIMI) regroupe les 450 chercheur-e-s de l'Institut mathématiques de Toulouse (IMT) et de l'Institut de recherche en informatique de Toulouse (IRIT). Les moyens fournis par le programme du LabEx permettent au CIMI d'être un centre de référence internationale, attirant des scientifiques de haut niveau, et de très bons étudiant-e-s en Master et Doctorat.

Cette combinaison originale mathématiques /informatique crée une réelle synergie appropriée pour l'exploration de nouveaux domaines de recherche et a déjà mené à la création d'équipes communes entre les deux Instituts. Parmi celles-ci, l'équipe Apprentissage, optimisation, complexité (AOC) travaille sur l'apprentissage des machines (machine learning), un des éléments-clés pour la mise au point de véhicules autonomes.

Ce domaine d'application suscite également de nombreux travaux de recherche sur la conception et la sécurité des systèmes cyber-physiques associant le logiciel et l'environnement dans lequel il fonctionne, la simulation et le développement de comportements autonomes (dans des cadres théoriques variés comme la théorie des jeux ou les algorithmes bio-inspirés), la certification des composants logiciels de sécurité ou encore le traitement à la volée d'une grande volumétrie de données générées par des capteurs embarqués sur les véhicules. Ces travaux contribuent ainsi plus généralement à la conception de l'écosystème des villes intelligentes de demain.

Christophe Besse, directeur du Labex CIMI

christophe.besse@math.univ-toulouse.fr
<http://www.cimi.univ-toulouse.fr/fr>

Direction : José Biosca

Coordination : Pascal Lemoine

Création graphique : Sandrine Lucas

Secrétariat de rédaction : Jean-Paul Bobin

Comité de rédaction : Catherine Dematteis, Valeria Medina
et Clément Blondel

Coordination scientifique : Béatrice Chatel et Morgane Gibert

Diffusion : La Dépêche du Midi

Couverture : Jules Pinton (CNRS)

Bien que la société Le Cèdre ait fait tout son possible pour citer correctement et contacter la source et/ou le(s) détenteur-rice-s du copyright de chaque photo, nous nous excusons par avance de toute erreur ou omission involontaire qui serait immédiatement corrigée dans une prochaine édition.



Journal de la Démocratie

Groupe La Dépêche du Midi

Société Anonyme au capital de 3 577 010 euros

Siège : Avenue Jean Baylet, 31095 Toulouse CEDEX

Tél : 05 62 11 33 00 - Fax 05 61 44 74 74

e-mail : contact@ladepeche.com

Président Directeur Général, responsable de la Rédaction :

Jean-Michel BAYLET

Directeur de la publication

Jean-Nicolas BAYLET

Commission paritaire n : 0320 C 87785 – ISSN 0181- 7981

Impression : Techni Print, avenue de Suède, 82 000 Montauban



© Adimas/Adobe Stock.com (également en couverture)

Remerciements :

En plus de leur contribution à ce *Petit Illustré des transports du futur*, le CNRS Midi-Pyrénées remercie particulièrement Alain Couret, Pascal Gaillard, Bertrand Girard, Thierry Lebey, Céline Lemerrier, Michelle Sibilla et Morgane Toumazet.



MA SANTÉ, C'EST SÉRIEUX.
J'AI CHOISI MGEN
MUTUELLE SANTÉ - PRÉVOYANCE
 Martin Fourcade et 4 millions de personnes ont choisi MGEN pour la confiance, la solidarité, l'accès aux soins de qualité et le haut niveau de prévoyance.

www.mgen.fr
 Siren n° 784 275 778 - RCS Meaux - Immatriculation ORIAS n° 07 027 138 - Illustration : Killoffer.

MGEN, Mutuelle Générale de l'Éducation Nationale, n°775 685 399, MGEN Vie, n°441 922 002, MGEN Fidu, n°440 363 588, mutuelles soumises aux dispositions du livre II du code de la Mutualité - MGEN Action sanitaire et sociale, n°441 921 913, MGEN Centres de santé, n°477 901 714, mutuelles soumises aux dispositions du livre III du code de la Mutualité.

À la CASDEN,
le collectif est notre moteur !

À la CASDEN, la mise en commun de l'épargne de tous permet à chacun de réaliser son projet aux meilleures conditions. Un modèle bancaire unique qui rassemble déjà plus d'1,6 million de Sociétaires...
Fonctionnaires, l'offre CASDEN vous est réservée !

Pour plus d'informations, contactez votre Animatrice Régionale
 Valérie MARIA
 valerie.maria@casden.banquepopulaire.fr
 06 77 31 56 81 (Appel non surtaxé, coût selon votre opérateur)

Découvrez la CASDEN sur **casden.fr** | Suivez-nous sur

CASDEN, la banque coopérative de toute la Fonction publique

CASDEN Banque Populaire - Société Anonyme Coopérative de Banque Populaire à capital variable. Siège social : 1 bis rue Jean Wiener - 77420 Champs-sur-Marne. Siren n° 784 275 778 - RCS Meaux. Immatriculation ORIAS n° 07 027 138. Illustration : Killoffer.

