



Transport aérien 2050 - Des recherches pour préparer l'avenir

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Transport aérien 2050

Des recherches pour préparer l'avenir

A v e r t i s s e m e n t

Les travaux ont été réalisés par l'Onera dans son Centre de Prospective Aérospatiale et co-financés par l'Onera et l'EREA (European Research Establishments in Aeronautics).

Pour sa part, l'Onera s'est largement appuyé sur l'expérience acquise dans le cadre de projets marquants dont il a été, ou est encore, maître d'œuvre ou coordinateur, parmi lesquels on peut citer :

- > **IFATS** (Innovative Future Air Transport System) sur une automatisation extrême du système de transport aérien,
- > **4DCo-GC** (4D Contract - Guidance&Control) sur les contrats 4D pour l'optimisation du trafic aérien,
- > **PPlane** (Personal Plane) sur un système de transport aérien personnel.

Les auteurs, scientifiques de l'Onera au sein du Département Prospective et Synthèse, sont :

- > **Bruno Lamiscarre**, adjoint au directeur, chargé de mission « Système de Transport Aérien » et directeur du programme IESTA (Infrastructure d'Évaluation du Système de Transport Aérien),
- > **Jean Hermetz**, chef de l'unité de recherche « Systèmes Aéronautiques »,
- > **Claude Le Tallec**, chargé de mission « Systèmes de Drones » et coordinateur des projets IFATS et PPlane,
- > **Muriel Brunet**, chef de projet « Clean Sky Technology Evaluator »,
- > **Antoine Joulia**, ingénieur de recherche, coordinateur du projet 4DCo-GC,
- > **Thomas Chaboud**, ingénieur de recherche.



Sommaire

Introduction	p. 5
Scénarios et options technologiques	p. 6
> Unlimited Skies	p. 7
> Regulatory Push-Pull	p. 15
> Down-to-Earth	p. 21
> Fractured World	p. 27
Domaines de recherche	p. 33
> Aéronefs	p. 35
> Contrat 4D et automatisation	p. 39
> Infrastructures aéroportuaires	p. 41
> Outils de conception et de validation	p. 43
Notre vision des priorités	p. 46

L'avenir d'un secteur de pointe est lié aux options prises, plusieurs décennies en amont, dans les laboratoires et centres de recherche. Énergies, matériaux, configurations, systèmes embarqués, infrastructures, protection de l'environnement : autant de domaines technologiques sur lesquels il faut miser à bon escient. En 2050, le trafic aérien aura beaucoup évolué, son environnement également. Mais jusqu'à quel point et en s'appuyant sur quels atouts ? Entre un développement sans borne, une régulation drastique, une disparition quasi-totale et une combinaison de ces trois hypothèses, les technologies gagnantes ne seront pas les mêmes. ■

Scénarios et options technologiques

Épuisement du pétrole, hausse des températures, creusement des inégalités à l'échelle planétaire : autant de facteurs décisifs qui vont, à court terme, influencer considérablement sur nos sociétés. Leurs effets sont déjà perceptibles. Le transport aérien et ses acteurs y sont d'autant plus exposés que ce secteur est consommateur de ressources, générateur de rejets et qu'une grande partie de sa raison d'être réside dans les échanges entre les hommes et les continents.

Certaines questions méritent donc d'être posées. D'ici quarante ans, le ciel sera-t-il encore le lieu du transport massif de passagers ? Seront-ils embarqués à bord d'appareils conventionnels toujours plus volumineux ou des configurations inédites seront-elles apparues à l'issue de ruptures technologiques majeures ? L'aviation offrira-t-elle un substitut à la voiture particulière ? Qu'appellerons-nous, alors, voyage aérien ? Aurons-nous migré des énergies fossiles actuelles vers des sources alternatives ? Aura-t-on su investir dans des systèmes de régulation du trafic propres à décongestionner nos aéroports, ou butera-t-on sur les limites d'un système déjà saturé ?

Autant d'interrogations qui, loin d'être théoriques, ont tout à voir avec la manière dont nos sociétés envisagent leur avenir et mobilisent leurs moyens de recherche. Des pistes existent pour façonner un monde différent dans lequel l'aérien gardera une place. Elles dépendent d'options technologiques et organisationnelles à choisir dans un futur proche. C'est pour en donner une représentation capable de constituer une aide à la décision que nous nous sommes attachés à imaginer la place du transport aérien en 2050 en s'appuyant sur les quatre scénarios définis par l'étude Consave¹. Autant de contextes, d'arrière-plans, sur lesquels nous avons bâti une structure, un substrat organisationnel assis sur des options technologiques pertinentes propres à offrir une vision globale, c'est-à-dire une vision système.

¹ Étude réalisée entre septembre 2002 et juillet 2005 par le consortium DLH, DLR, NLR, QinetiQ, IIASA, MVA, Airbus pour le compte de l'Union Européenne (<http://www.dir.de/consave/>).

UnLimited Skies





UnLimited Skies

Un secteur en pleine expansion, régulé par les automatismes

Le premier de ces scénarios se nomme *UnLimited Skies (ULS)*. Le monde dont il offre une représentation n'est pas fondamentalement contraint par la disponibilité de l'énergie. Non que la nécessité de l'économiser n'existe pas. Simplement, on ne se situe pas dans une logique de pénurie. Du coup, le paysage aéronautique présente une explosion significative avec le développement de nombreuses configurations d'appareils.

Dans le cas des gros porteurs d'architecture classique, déjà très proches d'un certain optimum, une diminution de la masse a pu être obtenue grâce aux progrès sur les matériaux, au bénéfice de l'emport, donc de la rentabilité. Des avions de 1000 places sont ainsi généralisés sans que leurs dimensions diffèrent sensiblement de celles d'un Airbus A380. Les aéroports classiques n'ont donc eu aucun mal à les accueillir. Une aérodynamique optimisée ayant abouti à une diminution de la traînée, ils consomment moins. Un aspect d'autant plus important que l'énergie fossile est de plus en plus chère. C'est l'un des aspects déterminants de ce scénario.

Si des concepts alternatifs comme les *Blended Wing Bodies (BWB)*, qui sont une évolution à corps central portant de l'aile volante, trouvent leur place, c'est pour profiter du rendement optimisé qu'offre ce type d'architecture. Grâce à l'évolution des capacités de stabilisation artificielle (chaînes de commandes gérées par des calculateurs), le problème majeur de cette configuration, qui résidait dans la difficulté de combiner contrôlabilité et performances, a disparu. D'autant que des dispositifs de soufflage de gouvernes sont désormais en mesure de générer de l'hypersustentation à moindre coût aérodynamique. Cela permet enfin d'exploiter les points forts de ce concept : un volume d'emport dont l'augmentation a peu d'impact sur le rendement. De quoi donner naissance à des appareils de grandes capacités aux dimensions raisonnables, tirant parti de la généralisation de matériaux composites, partiellement recyclables, à la résistance spécifique élevée, dont on maîtrise parfaitement le dimensionnement, la qualification et le comportement au cours du temps grâce au contrôle de santé intégré.



Blended Wings Bodies

Les *BWB* sont des extensions du concept de l'aile volante en cela que leur fuselage participe de manière encore plus significative à leur portance. Les ailes et l'empennage se résument en effet à des moignons. Du coup, le volume réservé au fret et aux passagers est maximisé, tout en permettant d'enfourer les moteurs dans la cellule, ce qui offre un masquage acoustique important. Cette configuration n'a pas que des avantages. L'embarquement et l'évacuation des passagers sont complexes et leur confort pas forcément idéal. Les personnes placées les plus au centre de la structure n'ont aucune visibilité vers l'extérieur tandis que les accélérations en roulis subies par celles assises le plus loin de l'axe central peuvent être gênantes.



Buried engines

Il s'agit de la technique consistant à enfouir les moteurs dans la cellule de l'appareil. Un concept parfaitement adapté aux *BWB*, les *Blended Wing Bodies* qui disposent d'un volume intérieur considérable.

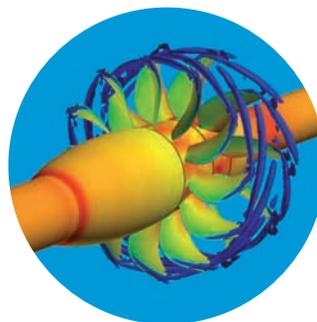
Du fait du volume disponible à bord, les *BWB* permettent en outre de mettre en œuvre certains concepts de propulsion novateurs. Par exemple, il s'agit de celui de *buried engines*, qui consiste à enfouir les moteurs à l'intérieur de la structure. Avantage : la traînée est réduite, au bénéfice de la consommation, tout en atténuant l'empreinte acoustique. C'est d'autant plus fondamental que, le trafic augmentant de manière spectaculaire, les nuisances pour les populations (notamment au voisinage des aéroports) doivent être prises en considération. La propulsion répartie figure également au chapitre des technologies innovantes permettant d'augmenter le rendement énergétique global tout en diminuant l'impact sonore. Elle consiste à répartir l'effet propulsif sur la cellule ce qui, en soufflant dans le sillage de la voilure, permet de recoller l'écoulement. Cette solution peut amener à dissocier la génération de la puissance de l'effet propulsif. La réduction de la traînée est également illustrée par le concept d'allongement infini de l'aile rhomboédrique, dont la rigidité structurale inhérente à ce type de forme et l'utilisation de matériaux modernes favorisent la réduction de la masse. On trouve des convertibles, combinant décollage et atterrissage verticaux avec vol sustenté classique. Tous ces appareils sont équipés de moteurs thermiques. La diminution de leurs rejets gazeux fait partie des axes prioritaires. De même, l'adoption de l'hélice, associée à des moteurs à pistons ou à des turbines, en remplacement de configurations à réacteurs permet de limiter la consommation sur certains types de trajets. Ce n'est pas forcément synonyme de diminution de la vitesse. Le *CROR*, pour *Contra-Rotating Open Rotor*, qui brasse encore plus d'air qu'un dispositif classique en générant un débit d'éjection proche de la vitesse de croisière, autorise par exemple des performances intéressantes. En revanche, parce que ses hélices sont à l'air libre, le bruit reste important dans la gamme des basses fréquences. Mais le gain économique qui découle de leur utilisation est tel que dans *ULS*, les hélices contrarotatives trouvent une utilisation massive.

Allongement infini (aile rhomboédrique)



Convertible sans pilote à bord

Simulation
aérodynamique
d'un *CROR*





Aéroport de type hub & spokes

Le paysage aéroportuaire présente une grande similitude avec la situation actuelle dans laquelle des *hubs & spokes* voisinent avec un réseau de plates-formes secondaires permettant de faire du point-à-point, pour relier par exemple des villes de province entre elles sans passer par une capitale. Le nombre des aéroports ne croît pas de manière significative. En revanche, comme la quantité d'avions connaît, elle, une progression spectaculaire, le mode de régulation est entièrement repensé pour éviter la saturation. À de rares exceptions près, la notion de pilotage conventionnel disparaît au profit du concept de *full automation* assorti de celui de *contrat 4D* (voir page 12). En liaison constante avec un dispositif globalisé de commande et de contrôle au sol, des avions dépourvus de cockpit adoptent et suivent automatiquement des trajectoires ajustées pour éviter les grands centres urbains, diminuer la route parcourue au profit de la consommation, sans attente, retard ni conflit. Elles incluent des profils de descente vers les zones d'approche adoptant des pentes importantes, parcourues moteurs au ralenti (voir page 12), au bénéfice des économies d'énergie et de la limitation du bruit.

Full automation

L'automatisation consiste à faire en sorte que le système ne dépende que marginalement de l'action humaine en temps réel. Toutes les procédures sont implémentées dans des automatismes, ce qui a comme conséquence de fondre la fonction de pilote à bord des avions et de contrôleurs au sol en une nouvelle fonction exécutée depuis le sol et dont le contour précis reste à définir. Chaque aéronef, en *contrat 4D* avec l'instance de contrôle ou même en *free flight*, est ainsi commandé par un automatisme. Il a des capacités coopératives en boucle locale qui lui permettent de résoudre des conflits eux-mêmes locaux, c'est-à-dire limitées à la portion de ciel l'entourant immédiatement. Cela permet, par exemple, de gérer l'imprévu, en particulier une situation dans laquelle la liaison vers ou depuis le sol est dégradée. Dans ce cas, les appareils ne recevant momentanément plus d'instruction du système peuvent se débrouiller seuls pour s'éviter, puis poursuivre leur vol. Le *full automation* ne signifie pas que l'homme sort totalement de la boucle. Il n'y a certes plus de pilotes dans les avions commerciaux, mais l'autorité à bord est confiée à un représentant de la compagnie (évolution de la fonction de commandant de bord). De même, au sol, si le contrôle aérien est assumé par le système, celui-ci confie la supervision du vol à des commandeurs qui peuvent, de manière stratégique, modifier certains éléments des trajets prévus. Par exemple, choisir un aéroport de déroutement, changer d'approche, etc. Pour un même vol, il pourrait y avoir autant de commandeurs que de centres de commandement par lesquels passe la route de l'avion.

Hub & spokes et point-à-point

Deux manières d'envisager la place d'un dispositif de plusieurs aéroports dans le cadre d'une organisation globale du transport aérien. *Hub & spokes* signifie moyeu et rayons, par analogie à une roue de vélo. Il présente une plate-forme aéroportuaire majeure (un aéroport international, le *hub*) vers laquelle convergent les lignes aériennes (les *spokes*) partant de terrains plus petits (des aéroports régionaux) qui le desservent. Du *hub* partent les vols longs courriers vers d'autres *hubs*.

Le réseau point-à-point, lui, peut se résumer à une série de plates-formes régionales entre lesquelles s'effectue le trafic.

Dans la pratique, la réalité consiste le plus souvent en une juxtaposition des deux concepts. Un système d'aéroports organisé en point-à-point par rapport à une structure *hub & spokes*, ce sont des vols plus nombreux pour le même nombre de passagers, des trajets plus courts en moyenne pour la même desserte et des aéronefs de plus petite capacité moyenne. C'est également un réseau moins fragile (pannes techniques, climat, sûreté) et des contraintes plus faibles en termes de capacités de contrôle. Sur le plan économique, le point-à-point constitue un avantage pour un marché fragmenté (avec ses compagnies « régionales » et ses mini-*hubs*). Pour les grandes compagnies, en revanche, il suppose une logistique plus complexe, plus coûteuse.

D'une manière générale, l'aérien y est moins dépendant d'autres modes de transport, parce qu'il est moins intégré dans une conception modulaire globale. Une organisation point-à-point serait nécessaire pour un transport aérien individualisé (*PAT*) qui peut exister dans le scénario *ULS*.

Au contraire, les grands *hubs* demandent évidemment des zones aéroportuaires à forte capacité, en termes de pistes, de portes, de terminaux, mais aussi de contrôle d'approche. L'augmentation du trafic sur Londres est ainsi bridée par la petite taille des cinq aérodromes concernés, qui génèrent d'ores et déjà de l'attente en vol.

Contrat 4D

C'est une planification précise et négociée des vols (préalable mais aussi en temps réel) assortie d'un suivi rigoureux des trajectoires et des horaires de passage. Le tout au bénéfice d'itinéraires évitant les conflits entre aéronefs, limitant les temps morts et maximisant l'utilisation de l'espace dévolu au trafic aérien. On peut donc mettre davantage d'appareil dans le ciel sans risquer de saturation, adopter des trajectoires optimisées complexes permettant d'économiser du carburant, de limiter les rejets de gaz et les nuisances sonores. « 4D » signifie que l'évolution se fait suivant les trois dimensions de l'espace, complétées de celle du temps. En pratique, l'avion négocie avec l'ATC un plan de vol 4D pour lequel il passe un contrat avec le système. Tant que l'appareil ne signale rien, l'instance de contrôle est assurée que ledit contrat sera respecté par l'avion. De son côté, l'avion est assuré par l'ATC (Air Traffic Control) qu'aucun conflit ne peut se produire. La situation peut évoluer en temps réel en cas d'incident, à l'issue duquel un nouveau contrat « sûr » est négocié et appliqué. La replanification en temps réel suppose évidemment que soient assurées la permanence et la

fiabilité des liaisons air-air en situation de proximité (capacités coopératives de tous les aéronefs) et air-sol. Le *contrat 4D* ne peut s'envisager que dans le cadre d'un système de gestion de trafic repensé et basé sur le concept de *full automation* ; il est en effet impossible pour le contrôleur d'exprimer verbalement une instruction de *contrat 4D*, pas plus qu'il est possible pour le pilote de l'entrer manuellement dans son FMS. En dehors des aspects directement technologiques, le principal obstacle du *contrat 4D* est son acceptation par les deux principales professions impactées, les pilotes professionnels et les contrôleurs aériens, mais également par le grand public. L'adoption de ce concept suppose également que les compagnies aériennes acceptent de ne plus choisir les routes et les horaires de leurs vols en fonctions de leurs intérêts propres mais qu'elles négocient avec le système des créneaux sur lesquels ce dernier aura le dernier mot. La régulation du trafic est en effet, dans ce cas, la priorité, soit pour éviter sa saturation, soit pour limiter les nuisances qu'il occasionne, le tout dans le respect d'un niveau de sécurité élevé.

Le *contrat 4D* incorpore la notion de temps. Les avions, guidés sur leur trajectoire durant l'intégralité du vol, respectent un cadencement strict afin de se trouver aux divers points de leur route à des heures données. Cela pour optimiser l'espacement entre aéronefs (adapté à la résorption de la turbulence de sillage, déjà minimisée par des dispositifs aérodynamiques actifs, tant du côté de l'avion qui la génère, que de celui qui la subit) et diminuer la largeur des couloirs aériens qui leur sont réservés. Cela permet au système, fonctionnant et se mettant à jour en temps réel, d'utiliser avant et après le passage d'un avion, le volume de ciel qu'il va bientôt occuper, puis libérer. En cas d'événement perturbateur (par exemple une météo rendant impraticable la route initialement prévue) ou d'incident technique, un nouveau contrat est négocié en temps réel entre l'avion et le système, permettant au premier d'adopter une nouvelle route sûre, c'est-à-dire sans situation de conflit avec un autre trafic. Les avions communiquent également entre eux et sont capables, si une modification immédiate de trajectoire est nécessaire (suite à une panne de moteur par exemple), de négocier de manière locale des contrats ponctuels leur permettant d'adopter des trajectoires adaptées au contexte et sans conflit.

Profils de descente moteurs au ralenti

Dans le cadre du *contrat 4D* tel qu'il est exploité dans le scénario *Regulatory Push-Pull (RPP)* notamment, il est important que le trafic aérien limite au maximum les nuisances pour l'environnement. Les deux principales sont les rejets de gaz dans l'atmosphère et le bruit. Les profils de descente moteurs au ralenti sont une manière de réaliser ce double objectif. La descente continue vers la zone d'approche finale et le terrain de destination limite (voire supprime) le temps passé à basse vitesse et faible altitude en palier, configurations où un jet notamment consomme beaucoup tout en étant très bruyant. De plus, mise en œuvre dans le cadre du *contrat 4D*, elle permet de réduire de manière drastique le volume de ciel dévolu à cette phase de vol, ce qui décongestionne les aéroports en fluidifiant le trafic, élimine les phases d'attentes, etc. Les avions restent moins longtemps en vol, ce qui réduit la nuisance sonore à proximité des plates-formes aéroportuaires. D'autant plus

qu'effectuées moteurs au ralenti, les approches sont particulièrement peu pénalisantes sur ce plan. Bref, on gagne sur tous les tableaux. Le seul inconvénient est qu'il est très difficile, pour un pilote, de réussir ce type de descente tout en respectant à la lettre les termes du *contrat 4D* et ce, dans toutes les configurations de vent, de température, etc. Maîtriser un profil de descente moteurs au ralenti suppose de prendre en compte la masse de l'appareil en temps réel, les conditions atmosphériques et d'adopter une trajectoire complexe sans se donner la liberté d'une possible remise de gaz (sinon, à quoi bon ?). Du coup, ce type d'approche liée au concept de 4D n'est envisageable qu'en *full automation* car un pilote humain ne pourrait sans saturation gérer autant de variables à la fois, de manière totalement reproductible sans risque d'erreur, donc de contretemps.

Du fait de la complexité et de la quantité des variables en jeu, totalement saturantes pour les capacités humaines, une gestion de ce type ne peut être confiée qu'au système. Si ces appareils sont occupés par des passagers, ils n'embarquent donc plus de pilote. Le rôle (à bord) de celui-ci a disparu avec l'arrivée à maturité du système de contrôle automatisé qui en assume désormais la fonction. L'homme demeure présent dans la boucle à travers deux fonctions distinctes : un superviseur dans l'avion (évolution du rôle de commandant qui, à bord, détient l'autorité et représente la compagnie) et un commandeur au sol (évolution du rôle de contrôleur vers celui de superviseur ayant mission de gérer les situations d'urgence non prévues par le système). Ce dernier peut intervenir à un niveau stratégique (par opposition au niveau tactique, qui se limite au local, par exemple le pilotage temps réel d'un aéronef), pour autant que le type de décision autorise un temps de réaction compatible avec les possibilités humaines. Ce sera, typiquement, le choix des routes à prendre, des types d'approche, d'une destination alternative en cas de déroutement. Un rôle qui, pour le même avion au fil de son voyage, peut être partagé par autant de commandeurs qu'il y a de centres de commande sur la route.

Le concept de *full automation* est diamétralement opposé à celui de *free flight* dans lequel les compagnies aériennes sont libres de choisir leur route pour exploiter au mieux de leurs intérêts l'espace aérien. Ici, c'est la notion de système global qui domine, à la réalisation duquel est subordonné l'ensemble des acteurs. Cela suppose, pour les compagnies, de négocier en amont avec l'organisme de gestion du trafic les points de départ et de destination, ainsi que les horaires qu'elles souhaitent proposer à leurs passagers. Le système se charge de les intégrer à l'ensemble du trafic, en termes de planification d'abord, puis en temps réel au moment du départ (attribution d'un créneau de décollage) et enfin au cours du vol. L'automatisation du « pilotage » concerne aussi bien le transport commercial que les liaisons d'affaires ou encore le *PAT*, ou *Personal Air Transport*. C'est un véhicule individuel à décollage et atterrissage très courts ou verticaux dont le développement à grande échelle dépend d'une rupture technologique majeure en matière de sustentation et de propulsion. Ce peut également être un hélicoptère ou un convertible. Dans tous les cas, le *PAT* emprunte à la voiture son caractère privé, sinon que son « pilote » se contente de choisir ses lieux de départ et d'arrivée, voire certains points de passage de son trajet.



Avion long courrier sans pilote à bord

Free flight

Ce concept ne signifie pas que le vol est libre de toute autorité de régulation du trafic. D'ailleurs, il est parfaitement gérable dans le cadre du *full automation*. C'est simplement l'opposé du *contrat 4D*. Les opérateurs (compagnies aériennes, sociétés de travail aérien, propriétaires d'avions d'affaires) peuvent choisir leurs trajets et leurs créneaux horaires sans que ceux-ci soient soumis à la régulation générale. Des avions sans pilotes peuvent très bien évoluer en *free flight*.

PAT

Le *Personal Air Transport* est l'extension aérienne du concept de véhicule automobile. Comme ce dernier, il représente une gamme complète allant de l'engin individuel à l'équivalent du minibus. La très grande différence est que la notion de pilotage disparaît totalement, remplacée par une gestion en *full automation*. Les occupants se contentent de choisir une destination, voire certains points de passage.

 eplane



À ce même automatisme sont également soumis les drones, militaires comme civils, dont les trajectoires (hippodromes de surveillance par exemple), sont compatibles avec la notion de *contrat 4D*. Restent les avions d'arme, ceux de secours et les appareils de loisir qui, eux, sont généralement pilotés. Dans le premier cas, tout comme pour les missions de police, de santé et les interventions du type pompiers volants, des trajectoires sont réquisitionnées à la demande (avec tout de même de fortes contraintes à la clé, la prééminence de l'activité économique étant marquée dans ce scénario), autour desquelles le contrôle fait « le vide » le temps du passage de la patrouille de chasseurs ou de l'hélico du SAMU. La gestion en temps réel permet de minimiser l'impact de ce genre de perturbation. Il n'y a donc plus, comme on en voit de nos jours, de volumes réservés aux militaires.

Quant à l'aviation légère (vol à voile ou motorisé), elle doit demeurer une discipline de pilotage, à condition toutefois d'être intégrée au reste du trafic automatisé. Elle est principalement constituée d'appareils à propulsion électrique, qui bénéficient de l'évolution normale de ce type de motorisation allant vers l'accroissement de la puissance spécifique. Ces avions demeurent très légers et de petite taille. En termes d'équipement, ils sont coopératifs : ils communiquent en temps réel leur position au système ainsi qu'aux autres aéronefs. De plus, leurs pilotes disposent d'une visualisation en 3D (de type *Head Up Display*, par exemple) du volume de ciel les entourant qui, par un codage couleur, indique si telle zone est libre, interdite (car occupée à l'instant t) ou si elle est sur le point de le devenir dans un délai déterminé. De quoi s'intégrer dans le système de manière naturelle et non conflictuelle.



Les choix technologiques en jeu

La pierre angulaire d'*ULS* est le couple *full automation-contrat 4D*, seul rempart contre la saturation d'un trafic aérien en augmentation. Il va de pair avec la mise au point de procédures « vertes », c'est-à-dire qui limitent les nuisances pour la nature et les populations. Dans un monde où l'énergie coûte cher, il est par ailleurs essentiel de développer des solutions performantes sur le plan de la consommation et permettant de rentabiliser davantage le transport aérien. C'est ce qui milite pour un effort du côté des concepts et configurations révolutionnaires d'appareils (ailes volantes notamment) et des matériaux légers. Enfin, le *PAT*, parce qu'il peut permettre de désengorger le trafic routier par basculement du côté des véhicules aériens individuels est une option à envisager sérieusement.

Ce que nous recommandons

Pour ce scénario, l'effort à fournir est principalement axé sur le concept de *full automation*, dont la maturité technologique est, comme pour le *contrat 4D*, bien avancée : même si la stratégie d'organisation qui le sous-tend demande encore du travail, de nombreuses briques technologiques sont déjà disponibles. Parvenir à l'implémentation n'est qu'une question de moyens financiers, de volonté politique et d'acceptabilité sociale. Les concepts et les configurations révolutionnaires d'appareils (*BWB* compris), déjà défrichés sur le plan de la recherche et du développement, demandent également un effort de réalisation. Parallèlement, le travail sur les matériaux légers, les procédures « vertes » et l'adaptation des techniques automobiles de propulsion électrique doit se poursuivre tous azimuts. La voie du *Personal Air Transport*, en revanche, est à explorer *ab initio*.

Regulatory Push-Pull





Regulatory Push-Pull

La régulation au bénéfice d'une approche globale du respect de l'environnement

Le second scénario, baptisé *Regulatory Push-Pull (RPP)*, emprunte à *UnLimited Skies (ULS)* ses concepts de *full automation* et de *contrat 4D* (voir pages 11 et 12). Mais alors que, dans le cas *ULS*, ils étaient exploités pour fluidifier un trafic en augmentation exponentielle, cette préoccupation n'a plus le même caractère vital. Tout simplement parce que le développement étant grandement limité par un canevas de règles, on ne risque pas le même type de saturation. Le monde qu'illustre ce scénario est en effet nettement plus comptable des intérêts communs, plus préoccupé de sa pérennité et conscient de sa fragilité, du fait notamment d'une série de contraintes très fortes. Celles-ci sont essentiellement d'ordre énergétique (le coût et la disponibilité des combustibles fossiles deviennent dissuasifs) et environnemental. C'est un univers dominé par l'électricité, produite principalement par le nucléaire, mais également par éolienne et solaire ou tout autre dispositif exploitant de manière écologique une ressource naturelle.

La problématique de régulation du transport demeure, mais elle est désormais considérée sous l'angle d'une approche système qui, parce qu'elle est globale, permet seule d'obtenir les meilleurs compromis en termes de consommation spécifique et de nuisances. Ces dernières sont de deux ordres principaux : les rejets dans l'atmosphère et le bruit. C'est ainsi que l'automatisation du trafic (*full automation* et *contrat 4D*) se trouve chargée de garantir l'adoption systématique de procédures « vertes » avec, par exemple, des trajectoires et des profils d'approche antibruit, moteurs totalement réduits sans remise de gaz. Les respecter à coup sûr dans des conditions météorologiques variables (vent notamment) n'a rien de facile pour un pilote. C'est en partie pourquoi les appareils en sont, dans leur très grande majorité, dépourvus. Ils sont donc soumis à des consignes de trajectoire strictes édictées par le système global qui permettent, par le calcul fin et en temps réel des pentes de descente adaptées à chaque machine en fonction de sa masse instantanée, de minimiser leur impact environnemental. De même, l'automatisation du vol permet, en fonction des conditions de la masse d'air (humidité, température), de décaler verticalement l'ensemble du trafic afin de l'éloigner des altitudes favorisant l'apparition de traînées de condensation qui, nuages de particules de glace agissant comme écran au rayonnement terrestre, contribuent à l'effet de serre, donc au réchauffement global.



Trainées de condensation



Infrastructure aéroportuaire « verte »

Matériaux supraconducteurs

Ce sont des matériaux dont la propriété est de transmettre le courant électrique sans déperdition d'énergie. La montée en puissance de la propulsion électrique rend ce type de technologie fondamentale. Elle existe déjà, mais se limite à des températures de fonctionnement extrêmement basses dont l'accessibilité pose de nombreux défis technologiques.

Propulsion hybride

A l'instar de celle qui est mise en œuvre dans les automobiles, la propulsion hybride combine le fonctionnement de moteurs à cycle thermique et de machines électriques. Dans certaines phases de vol, la génération d'électricité peut ainsi être fournie par les moteurs à cycle thermique, dans d'autres, directement par des batteries.

Tout comme dans le cas du scénario *ULS*, cette régulation exclut son contraire, le *free flight* (voir page 13), qui ne peut s'envisager que dans un contexte d'absence de contraintes environnementales et de faible densité de trafic. C'est logiquement un monde dans lequel les infrastructures doivent faire la preuve de leur caractère neutre en termes de génération de CO₂. Les aéroports, par exemple, ont l'obligation d'être moins polluants, moins bruyants mais également de contribuer positivement au bilan écologique global en adoptant (dans le cadre des activités purement « sol », donc aéronefs exclus) des sources d'énergie ne produisant pas de CO₂ ou, à défaut, en compensant leurs émissions par l'implantation de puits de gaz carbonique, des espaces de forêts par exemple. Il y a moins de *hub & spokes* et davantage de plates-formes exploitées en réseau point-à-point (voir page 11). Certaines sont reliées entre elles ou communiquent avec un hub *via* une liaison ferroviaire (réseau électrique) constituant, selon les distances et les conditions de milieu, un compromis meilleur que l'avion eu égard aux priorités environnementales de ce scénario (voir page 16). Le voyage aérien lui-même est reconsidéré par la société dans une optique globale, les passagers ne payent plus seulement leur billet mais compensent le coût environnemental de leur déplacement en contribuant par exemple à la replantation d'espaces forestiers. Une démarche « CO₂ solidaire », un temps limitée aux plus militants et qui a fini par devenir l'un des principes fondamentaux de la civilisation qui est celle de ce scénario.

D'une manière générale, l'aérien est confronté à la nécessité de démontrer sa pertinence, comparé à d'autres moyens de transport. Face à ces contraintes, les aéronefs évoluent. Les avions, bien moins nombreux (du fait d'une demande plus faible), sont également plus petits que dans le scénario *ULS* et illustrent de manière moins évidente la variété des solutions possibles. En revanche, les contraintes fortes imposées par la société militent pour l'exploitation de concepts plus novateurs. L'accent est en effet mis sur la limitation des rejets, les économies d'énergie, pas seulement en exploitation mais sur l'ensemble du cycle de vie du véhicule : typiquement, « l'avion vert ». Du coup, à cause de leur caractère polluant, on met au rebut les appareils dont les moteurs thermiques sont les plus anciens et on favorise l'expansion massive de l'électrique, dont l'énergie est produite par des sources diverses. Cette évolution est grandement facilitée par la mise au point de matériaux supraconducteurs non conventionnels qui permettent, par leur résistance interne quasi nulle, de faire transiter du courant sans déperdition. Le progrès vient de la température à laquelle ils peuvent être exploités : son augmentation dans une fourchette bien plus facilement accessible par la technologie (par exemple, nettement au-dessus de -170°C) minimise la complexité et la masse des systèmes de refroidissement à embarquer à bord. Le *Blended Wing Body (BWB)*, une évolution de l'aile volante, se prête bien à une gamme étendue de concepts de propulsion et de motorisation (voir page 9). Le volume intérieur important (idéal pour le transport de fret, ou pour la combinaison passagers-marchandises) de ce type de configuration permet, en les enfouissant dans la structure (*buried engines*), de loger des moteurs thermiques qui génèrent alors moins de bruit et retrouvent une légitimité. Ces avions peuvent tout aussi bien être dotés d'une propulsion électrique tirant son énergie d'un petit réacteur nucléaire placé dans

le fuselage, ou encore de capteurs solaires, facilement répartissables sur la partie supérieure du corps de l'appareil. La propulsion hybride peut également devenir une bonne solution de compromis.

Aile rhomboédrique

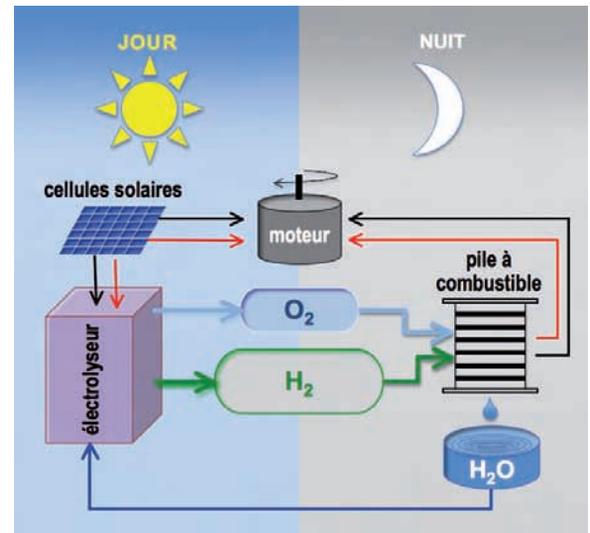


La pile à combustible régénérative fait aussi partie des options adoptées. Les biocarburants ne sont considérés comme une bonne solution que dans la mesure où leur bilan global (toujours l'approche système) est favorable. Rien ne sert en effet de miser sur une énergie supposée verte si, pour produire les végétaux nécessaires à son obtention, on dépense tant d'eau, on consomme tant de gasoil (engins agricoles) et on rejette tant de gaz dans l'atmosphère que l'on en vient à déséquilibrer le système par ailleurs. Sans compter que les terres occupées à cette fin ne sont alors plus disponibles pour cultiver de quoi nourrir les populations. Cette démarche intellectuelle est typique du scénario *RPP*.

L'hélice se généralise. Les solutions contrarotatives (voir *CROR* page 10), du fait de leurs nuisances sonores importantes, voient leur emploi très ciblé sur les vols évitant les terres habitées, les liaisons entre continents par exemple. D'une manière générale, on vole moins vite dans ce scénario. Les flèches moins accentuées des voilures reflètent cette tendance, de même que leur allongement plus important. Les grands trajets sont plus fractionnés, principalement pour limiter la consommation. Des solutions de ravitaillement, en vol mais aussi *via* des plates-formes situées au milieu des océans (servant également au transit des passagers), sont essayées et, lorsqu'elles génèrent une économie de carburant, adoptées. Ce n'est pas forcément toujours le cas puisqu'à l'issue du ravitaillement, les appareils doivent évidemment remonter en altitude pour reprendre leur trajet, ce qui est consommateur d'énergie. C'est pourquoi des concepts de remorqueurs sont également étudiés pour assurer la mise en altitude des véhicules afin qu'ils entament leur croisière avec leurs réservoirs pleins. De même, sont envisagés des appareils civils ravitailleurs en vol. Par voie de conséquence, on vole moins haut, ce qui signifie qu'avions et passagers sont exposés plus durablement au mauvais temps et à la turbulence. Un effet compensé en partie par la conception de voilures plus souples (amortissement) et par l'adoption de dispositifs de détection de la turbulence (pour l'éviter) et de « pilotage » de son effet sur l'appareil si celui-ci y est malgré tout confronté, par l'utilisation de dispositifs miniaturisés (*MEMS* : *MicroElectroMechanical Systems*).

Pile à combustible régénérative

Dans son principe, ce concept met en œuvre une pile à combustible pour transformer l'hydrogène et l'oxygène en électricité, et un électrolyseur qui transforme en sens inverse l'eau produite en hydrogène et oxygène. L'énergie nécessaire à cette électrolyse peut être produite par des panneaux solaires. Ce concept dispose d'une capacité de fonctionnement de jour comme de nuit et permet de réduire la masse dévolue au stockage du carburant (hydrogène) et de l'énergie électrique (batteries).



Morphisme

Ce concept très large embrasse à la fois les *smart materials*, ou matériaux intelligents, et la modification en temps réel de la géométrie des ailes et/ou des avions. Dans le premier cas, ce sont des matériaux réagissant à des *stimuli* pour modifier leurs propriétés, par exemple mécaniques : déformations, souplesse, etc. Une voie de recherche très importante qui a permis d'aboutir, notamment, au concept de souplesse active. Dans le deuxième cas, il s'agit de dispositifs (parfois constitués des mêmes matériaux) venant altérer le profil d'une aile. L'idée qui sous-tend ce concept est de s'affranchir pour une grande part des dispositifs hypersustentateurs de types volets et becs qui pèsent lourd et entraînent beaucoup. À la place, on génère une altération en temps réel des écoulements sur la voilure, soit en déformant celle-ci (*via* l'actuation de minuscules surfaces de contrôle), soit en générant par soufflage des phénomènes locaux capables de recoller les filets d'air. Du coup, le rendement aérodynamique dans toutes les phases du vol peut être optimisé, au bénéfice de la consommation ou de la contrôlabilité. Ces techniques vont de pair avec la mise au point de capteurs intelligents permettant de surveiller en temps réel l'état de forme d'une voilure, celui des matériaux la composant et sur lesquels il faut agir pour l'adapter au mieux à la phase de vol, et enfin pour vérifier leur vieillissement ou si leur déformation n'a pas dépassé le seuil de tolérance. C'est le contrôle de santé intégré, ou *Structural Health Monitoring (SHM)*. Enfin, l'exploitation de ces technologies suppose de mettre au point des méthodes de calcul complexes capables de donner une idée claire de la résistance, de la souplesse ou des cycles de vieillissement d'une structure constituée de différents matériaux dans lesquels seront noyés une quantité importantes de capteurs nécessaires à leur surveillance.

Le morphisme est une voie de recherche très importante qui a permis d'aboutir, notamment, au concept de souplesse active. Les effets des hypersustentateurs traditionnels (becs, volets), qui ont l'inconvénient de peser et de traîner, sont obtenus par une altération en temps réel des écoulements sur la voilure, soit en déformant celle-ci (*via* l'actuation de minuscules surfaces de contrôle judicieusement positionnées), soit en générant par soufflage des phénomènes locaux propres à recoller les filets d'air. Et ce, au bénéfice du rendement aérodynamique dans toutes les phases du vol. Gérées par de puissants calculateurs embarqués, les deux approches peuvent évidemment se combiner. Elles ne sauraient toutefois exister sans le développement de matériaux à la souplesse adaptée ou encore à mémoire de forme qui, naturellement, restent recyclables.

La généralisation des réseaux point-à-point (voir page 11) favorise l'utilisation du *PAT*, ou *Personal Air Transport* (voir page 13), qui, par ses capacités de décollage et atterrissage courts ou verticaux et sa propulsion exclusivement électrique est facilement intégrable en milieu urbain, à la manière d'une voiture personnelle. Sur le même concept, des gammes complètes sont proposées, permettant un emport de passagers allant du véhicule monoplace à l'équivalent du minibus.

Le vol militaire, tout comme les interventions d'urgence (SAMU, police, pompiers volants) s'intègrent de la même manière que dans le cas de *ULS*, c'est-à-dire par réquisition de trajectoires que le contrôle, gérant les priorités, libère le temps du passage des avions. L'aviation éducative et sportive, instrumentée de manière à disposer de capacités coopératives, conserve une place, notamment grâce à la propulsion électrique, très efficace du fait des progrès réalisés à la fois pour les autres types d'appareils et pour les moyens de transport terrestres.



Les choix technologiques en jeu

C'est parce que les solutions anciennes ne sont plus éligibles que *RPP* figure le scénario le plus riche en matière de technologies clés. On y retrouve tout ce qui contribue à la réduction des nuisances, des rejets et de la consommation d'énergies fossiles. Notamment les avions électriques et, d'une manière générale, les concepts et configurations innovants, comme le *BWB*, le contrôle actif de l'écoulement ou les matériaux et capteurs intelligents. En termes de vision globale, il faut noter le concept de « *CO₂ neutral* », appliqué aussi bien aux aéroports qu'aux dispositifs de propulsion. Sur le plan organisationnel, ce scénario est dominé par le *contrat 4D* et la *full automation*, mis au service de procédures vertes dictées par un souci d'économies et de régulation du trafic devenu vital.

Ce que nous recommandons

La priorité est à faire porter sur cinq technologies clés. Quatre d'entre-elles étant encore à un stade embryonnaire, elles demandent un effort soutenu de recherche, développement et réalisation. Il s'agit de l'avion électrique, des modes de propulsion neutres en *CO₂*, de l'automatisation complète du trafic et des concepts d'appareils marquant une rupture technologique (qui sont pour l'heure les seuls à bénéficier d'un travail de recherche-développement significatif). La cinquième est l'aéroport neutre en *CO₂*, dont il ne reste qu'à concrétiser l'implantation. Les autres technologies sont moins cruciales, à l'exception des procédures vertes qui, dans l'optique de *RPP*, sont importantes. Enfin, ce scénario étant très demandeur de technologies de toutes sortes, c'est probablement celui qui exigera le soutien de la recherche le plus important.

Down-to-Earth





Down-to-Earth

Un monde qui fonctionne quasiment sans énergies fossiles et ne rejette rien

Ce troisième scénario présente une situation radicale en ce qu'elle traduit la volonté politique de se passer tout simplement d'énergies fossiles. Celles-ci ne sont pas nécessairement épuisées mais on décide de cesser de ponctionner la nature en figeant les réserves en l'état. En cessant de rejeter des substances polluantes également. Il ne faut donc pas nécessairement y voir la suite catastrophique d'une période d'hyperconsommation et de développement tous azimuts comme l'illustre *UnLimited Skies (ULS)*, à l'issue de laquelle – parce qu'on l'aurait poussée à son terme – on aurait utilisé la dernière goutte de pétrole. C'est bien davantage la résultante d'un choix raisonné et conscient : on considère socialement qu'il faut cesser d'impacter négativement sur la planète. L'activité économique lui est intégralement subordonnée. L'électricité (générée aussi bien par le nucléaire, que par l'énergie solaire, éolienne ou hydrolienne) domine donc de manière écrasante les activités humaines, obligatoirement vertes.

Dans ce contexte, le trafic aérien commercial, parmi d'autres activités industrielles de même type, est totalement remis en cause parce qu'il consomme de l'énergie, mais aussi parce qu'il est générateur de rejets, donc qu'il contribue à l'effet de serre. Sur les continents, c'est le train à propulsion électrique qui devient le moyen de transport en commun privilégié. Pour les trajets océaniques, des bateaux à voile de très grandes dimensions sont exploités, puissant, pour l'ensemble des servitudes du bord, leur énergie dans des capteurs solaires. Mais, globalement, au lieu de se déplacer dans le cadre de leur métier, les gens se réunissent désormais par vidéoconférence, la plupart du temps depuis leur domicile ou leur bureau d'où ils exercent leur activité en télétravail. La réalité virtuelle remplace une partie des besoins que ne permet plus de satisfaire un monde dans lequel on ne va plus aussi facilement, ni aussi vite, à l'autre bout de la planète. Il n'y a bien entendu plus d'aéroports, devenus inutiles depuis la disparition du trafic aérien commercial. Les seules activités aériennes acceptables sont celles qui préservent l'intérêt général ou, à la marge, qui peuvent faire la preuve de leur totale neutralité vis-à-vis de l'environnement.



Priorité aux énergies renouvelables



Priorité aux missions de surveillance

D³

Le concept D³, pour *Dirty, Dull & Dangerous* (sales, très ennuyeuses et dangereuses), qualifie des missions qui, parce qu'elles s'effectuent dans des conditions humainement intolérables, sont confiées à des aéronefs automatiques. C'est typiquement le cas des avions d'observation restant, du fait d'une autonomie importante, plusieurs jours en vol, mais aussi de véhicules effectuant des missions de surveillance au cœur des zones de catastrophes naturelles.

La première d'entre elles est militaire. En effet, les Etats tels qu'on les connaît demeurent, avec leurs frontières, et entendent exercer leur souveraineté. Il y a donc toujours des avions d'arme équipés de réacteurs ou de turbines, pilotés par des humains, qui voisinent avec des drones et des engins automatiques, par exemple pour leurs missions routinières. Ces appareils sans pilote ont très peu évolué par rapport à l'époque actuelle, sinon qu'ils sont équipés de piles à combustible régénératives ou de capteurs solaires pour alimenter de petits moteurs électriques. Sont également considérés comme acceptables les vols effectués, à partir de petits aérodromes ou d'héliports, par les services chargés des interventions d'urgence, pour des objectifs ponctuels : police, santé, secours et lutte contre les incendies. On utilise pour cela des aéronefs classiques, par exemple des hélicoptères dotés de turbines thermiques pour le SAMU et la police, des équivalents de bombardiers d'eau Canadair pour les soldats du feu. Si ces plates-formes rejettent effectivement du CO₂, elles sont en nombre si limité que leur impact sur l'environnement est négligeable. Cette exception à la règle commune est donc parfaitement acceptable, notamment en regard du considérable bénéfice qu'en tire la société.

Ces aéronefs sont potentiellement alimentés par des biocarburants qui remplacent le pétrole, mais seulement si cette production ne vient pas par ailleurs rompre le fragile équilibre écologique. Si elle épuise les ressources en eau du fait des besoins d'arrosage, mieux vaut utiliser du pétrole. En effet, à ce rythme de consommation des énergies fossiles, les ressources existantes peuvent quasiment être considérées comme inépuisables.

Des systèmes automatiques sont mis au point pour assurer les missions de surveillance, d'observation ou présentant un danger important, suivant le concept D³, pour *Dirty, Dull & Dangerous*. Elles sont, comme pour les drones militaires, généralement effectuées par des engins électriques non habités car la logique de préservation et de respect de la nature s'est étendue à la vie humaine. La tolérance de la société à l'exposition des personnes au danger est en effet devenue très limitée. D'une manière générale, bien que bénéficiant d'un statut particulier, militaires, policiers, médecins et pompiers sont soumis à la logique environnementale prévalant dans l'ensemble de la société. C'est ainsi que les bases aériennes, par exemple, doivent faire la preuve de leur neutralité en matière d'émissions de gaz carbonique. Leurs rejets, examinés à travers le filtre d'une approche globale de l'environnement, sont donc équilibrés par l'implantation d'espaces forestiers (ou tout autre puits de dioxyde de carbone).



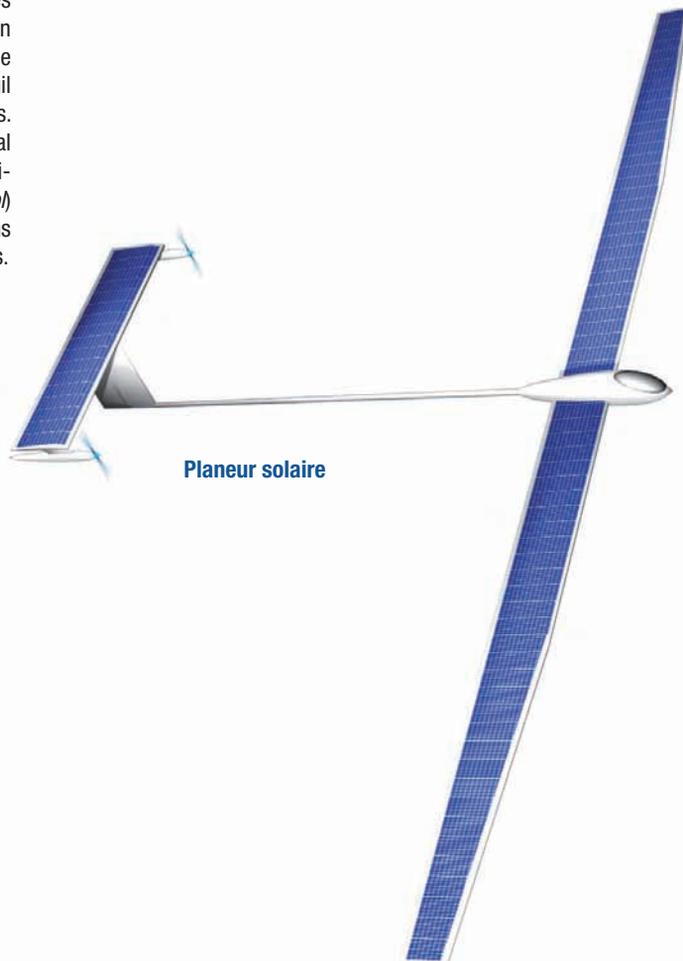
Centrale solaire

L'aviation légère n'a sa place dans ce contexte que si elle est totalement neutre pour l'environnement. Il est toutefois logique de concevoir que des progrès technologiques effectués au bénéfice d'autres applications permettent, par effet d'aubaine, de conserver une activité aéronautique éducative et sportive. Typiquement, la propulsion électrique, dont la miniaturisation et l'augmentation des performances (sans oublier la capacité à recycler sans pollution les batteries...) réalisée pour l'industrie automobile, peut autoriser la conception d'appareils très légers ne rejetant rien dans l'atmosphère et dont l'énergie serait gratuite pour l'environnement. Les planeurs, décollant à l'aide d'un treuil électrique, ou les moto-planeurs électriques seraient, eux, totalement légitimes. Tous ces aéronefs pilotés ou contrôlés à distance (militaires, d'intérêt général ou de loisirs) évoluent en *free flight*, c'est-à-dire que leurs opérateurs choisissent leur route de manière libre, en contact avec un ATC (*Air Traffic Control*) minimal. Ils sont effectivement peu nombreux et ne voisinent qu'avec des engins très automatisés, aux capacités de coopération en boucle locale développées.

Voiture électrique



Planeur solaire



Motoplaneur électrique





Les choix technologiques en jeu

Ce sont les technologies liées à la motorisation électrique et à la propulsion neutre en CO₂ qui sont à privilégier. Il ne saurait en effet y avoir d'activité aéronautique sans elles puisque l'urgence est de ne pas polluer et d'utiliser le moins possible d'énergies fossiles. Les infrastructures équilibrant leurs rejets par des puits de carbone en constituent le complément logique. Les nuisances vis-à-vis de la nature passant aussi par le bruit, la réduction des émissions sonores et les procédures vertes sont donc très importantes. Enfin, le trafic étant très faible, *Down-to-Earth* est le territoire naturel sur lequel développer le *free flight*.

Ce que nous recommandons

Un investissement prioritaire est à réaliser sur les avions électriques, mais aussi sur la propulsion et les bases aériennes neutres en CO₂. Si ces dernières sont quasiment envisageables à l'heure actuelle, ce n'est pas vrai des deux premières technologies, pour lesquelles un effort massif est nécessaire, y compris en termes de recherche et développement. L'effort sur la réduction du bruit ainsi que sur les procédures vertes est à poursuivre, tandis que le *free flight* et l'*Air Transport System* « minimal » sont considérés, vu le volume d'activité aérienne attendu, comme moins fondamentaux.

Fractured World





Fractured World

Une juxtaposition de mondes autarciques aux développements très contrastés

Le dernier scénario, *Fractured World (FW)*, offre une vision géopolitique inédite. Le monde s'est scindé en blocs distincts à l'issue de crises politiques et économiques majeures en partie causées par une inégalité face aux conséquences du réchauffement climatique global et à l'accès à l'énergie. N'y sont pas étrangères non plus les aspirations parfois contradictoires des peuples en fonction de leur histoire et de leur manière de percevoir leur rapport à la planète. Au moment où les Chinois s'engageaient dans une logique de production industrielle galopante assortie d'un appétit de consommer d'autant plus fort qu'il a été longtemps contenu, en Europe occidentale, des pays fédérés par une communauté d'intérêt prenaient conscience, après en avoir longtemps fait de même, de la nécessité de cesser cette fuite en avant. Chacun s'est donc replié chez soi, pour adopter ses propres solutions en fonction des valeurs dont il se sent porteur.

Relativement homogènes géographiquement, ces ensembles de nations ont plus ou moins la taille d'un continent. Y règne un climat largement paranoïaque où l'on sent bien que s'il reste ici et là quelques ressources, notamment en énergies fossiles, il n'y en aura plus pour longtemps et surtout pas pour tout le monde... même lorsque l'on se situe dans une zone favorisée.

On s'observe donc mutuellement, prêt à profiter d'un avantage compétitif. Les tensions qui résultent de cette situation conduisent à une augmentation du trafic aérien militaire (parmi d'autres manifestations de la souveraineté) à l'intérieur et à la périphérie des blocs. Il est en effet de toute première importance pour les Etats qui les constituent d'assurer leur sécurité face à l'extérieur mais également vis-à-vis de leurs voisins immédiats. Les échanges entre ces zones désormais autarciques ne se font plus qu'à la marge, ce qui élimine la notion de transport aérien long courrier entre blocs distincts. À la place, se sont développées des solutions de communication à distance tandis que l'on ne part en vacances à l'autre bout du monde que par réalité virtuelle interposée. Une aviation commerciale régionale perdure à l'intérieur des blocs, dans le meilleur des cas. En effet, tous ne se sont pas développés de la même manière. Les uns, constitués de pays très riches aux ressources et à l'influence politique demeurrées importantes, ont encore les moyens de laisser à leur économie la bride sur le cou. Ils évoluent donc dans la logique *UnLimited Skies (ULS)*, le premier scénario. Sur ce type de zone, on a laissé progresser l'expansion du trafic aérien sans l'entraver par une réglementation contraignante en termes d'environnement.

Jet supersonique



Il faut dire que le territoire est vaste, relativement peu peuplé et que ses ressources en combustible fossile ne sont pas négligeables. La priorité demeure donc économique et industrielle, sans qu'il soit socialement et politiquement soutenable de limiter l'expansion. À tout le moins tant que celle-ci ne fait pas subir aux citoyens des conditions de vie inacceptables, contraignant par ricochet les politiques à légiférer. Parmi elles, on compte l'accès de plus en plus coûteux à l'énergie ou les nuisances consécutives à l'expansion du trafic aérien. La seule véritable contrainte est en effet d'éviter la saturation. C'est pourquoi, on agit dans le sens de sa fluidification en le régulant par le recours massif aux automatismes (*full automation* et *contrat 4D*). Les avions long courrier ont disparu, remplacés au sommet de l'échelle du transport de masse par des moyens courriers sans pilote. Par voie de conséquence, il n'y a plus d'aéroports internationaux. Le réseau des infrastructures reste organisé de manière duale : *hubs & spokes* (amputés de leur actuelle dimension internationale) et point-à-point. L'aviation d'affaires reste présente (suivant un éventail très large allant jusqu'au jet supersonique) ainsi que le *PAT* (*Personal Air Transport*), qui tend à remplacer la voiture particulière.

Ce monde très riche voisine avec des zones qui le sont moins. Elles n'ont ni les mêmes ressources, ni la même influence. Ses habitants sont plus conscients des limites de leur mode de vie et de sa fragilité face à l'épuisement des énergies fossiles notamment. Sans faire le deuil de son industrie, un tel ensemble entend réguler l'activité avec comme priorité réduction de l'impact des activités humaines sur l'environnement. C'est devenu une préoccupation politique majeure sur laquelle s'accorde l'ensemble de la société. On y adopte donc naturellement le scénario *Regulatory Push-Pull* (*RPP*) qui ne soumet plus ses choix politiques aux intérêts du marché et exploite les capacités de gestion automatisée du trafic à des fins de protection de l'environnement et de limitation drastique des nuisances pour les hommes.

Les concepts de *full automation* et de *contrat 4D* sont utilisés dans ce but spécifique, tandis que l'accent est mis sur les technologies vertes, afin de consommer et de rejeter moins : propulsion électrique, ailes à grand allongement (et même allongement infini), matériaux légers, configurations innovantes comme les *Blended Wing Bodies*, *PAT*. C'est sur ce type de zones que s'expriment le plus de technologies innovantes, tout simplement parce que c'est là que le compromis à trouver est le plus contraignant : produire et consommer encore, mais en tenant compte des conséquences. Et ce, de manière globale, en ayant une approche système. Le territoire, moins vaste, milite pour des appareils encore plus petits, dimensionnés pour le transport régional, aux vitesses et aux niveaux de vol limités.

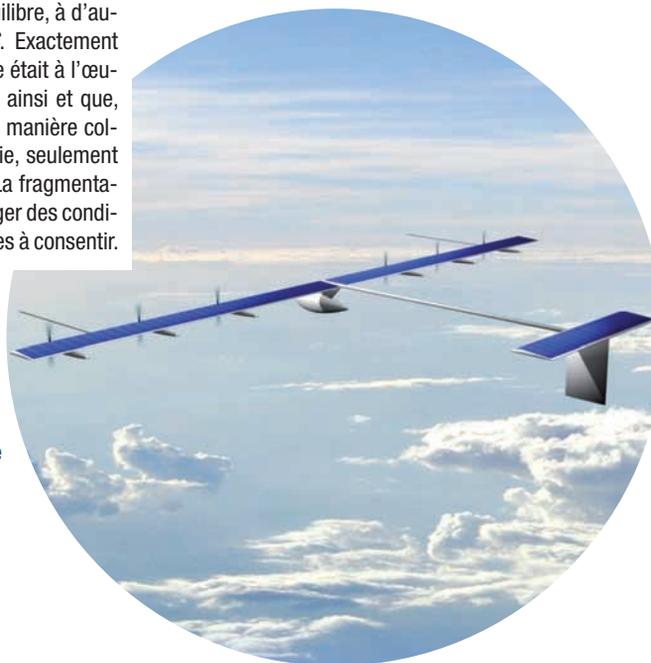
Enfin, d'autres zones existent où l'on a, soit par nécessité, soit par choix raisonné, décidé de mettre fin à la logique antérieure. Au lieu de consommer en ponctionnant la nature et en la polluant par les rejets de l'activité humaine, ses habitants ont résolu de figer en l'état les stocks d'énergie et de ne plus recourir qu'à des ressources renouvelables. Un bloc de ce type fonctionnera suivant la logique du scénario *Down-to-Earth* (*DtE*). Il n'y a plus de trafic aérien com-

Avion sans pilote à bord
avec propulseurs « open rotor »



mercial. Du coup, l'aviation est réduite aux missions militaires et d'intérêt général. Une activité à la densité si faible qu'elle peut sans problème fonctionner en *free flight*.

Le fait que ces zones soient repliées sur elles-mêmes ne signifie pas qu'elles n'ont pas d'influence les unes sur les autres. Il est notamment difficilement imaginable que des pays évoluant dans une logique *DiE* supportent facilement la fuite en avant qu'illustre *ULS*. Car si l'organisation politique et les choix stratégiques différents ont abouti à une fragmentation en agrégats de pays, les courants aériens, les océans, véhiculent, eux, sans frontières, les rejets des uns vers les sanctuaires naturels ménagés par les autres. Faut-il pour autant en conclure que de telles différences de mode de vie sont vouées à se résorber à l'occasion d'une crise majeure qui mettrait fin au scénario *Fractured World*? Pas nécessairement car si des zones entières du monde fonctionnent en *RPP* ou, mieux en *DiE*, cela permet justement, par effet d'équilibre, à d'autres ensembles de demeurer plus longtemps encore en *ULS*. Exactement comme si un phénomène de compensation à l'échelle planétaire était à l'œuvre. Il est toutefois possible que les choses ne se passent pas ainsi et que, sous l'effet de la pression internationale, les pays du monde, de manière collective, décident d'adopter plus ou moins un même mode de vie, seulement modulé en fonction des ressources propres dont ils disposent. La fragmentation signifierait alors le repli sur soi de chaque zone afin de ménager des conditions de vie en rapport avec les efforts que ces sociétés sont prêtes à consentir.



Avion solaire

Les choix technologiques en jeu

Ils varient en fonction des zones du monde et de la logique dans laquelle ils se situent.

Ce que nous recommandons

Les options à privilégier dépendent du scénario et recourent celles qui sont données à l'issue de chacun d'eux.

Les domaines de recherche

sur lesquels
investir
pour que
l'aérien
demeure
à l'horizon
2050

Ces quatre scénarios sont des supports conçus pour alimenter une réflexion. Brossés à larges traits, ils dépeignent des situations très contrastées, de manière à ce que ressortent nettement leur substrat organisationnel et ce qu'ils signifient en termes d'effort de recherche à fournir. Parce que la réalité et l'évolution des sociétés sont toujours plus subtiles et complexes que cet exercice de prospective est susceptible d'embrasser, il est peu certain qu'à l'horizon 2050, le transport aérien présente une situation qui les recoupe tout à fait. Cependant, cette étude fait émerger une feuille de route. L'infinité des variables en jeu, la finesse des équilibres possibles, la manière dont l'histoire même de ces quarante prochaines années va en structurer l'évolution vont donner au monde dans lequel nous vivrons en 2050 des contours pour une part inédits. Toutefois, on devrait y retrouver une proportion déterminante des caractéristiques exposées dans ces quatre scénarios et, donc, les technologies, concepts et systèmes que nous leur avons attachés. La justification de ces solutions de natures diverses est essentiellement de permettre à l'homme, à travers le transport aérien, de conserver une mobilité sans pour autant scier la branche sur laquelle il a pris place. Cela suppose de miser sur un certain nombre de domaines de recherche parmi lesquels se trouvent les nouveaux concepts d'aéronefs et les technologies, l'automatisation et la gestion du trafic, les infrastructures au sol et enfin les indispensables outils de conception et d'évaluation. Autant d'options qui partagent un double souci, celui de respecter l'environnement et de réduire la consommation énergétique. Et cela, envisagé dans une approche système, la seule à permettre la prise en compte de l'impact réel de la mise en œuvre d'une solution quelle qu'elle soit, de la production au recyclage, en passant par sa phase d'exploitation, et dans toutes ses interactions avec le milieu.

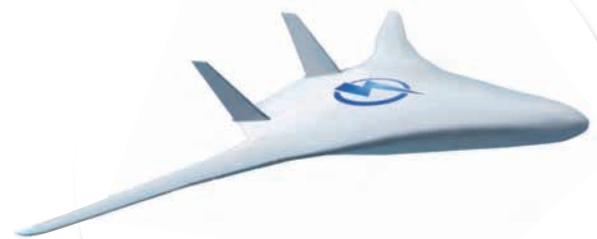


Aéronefs

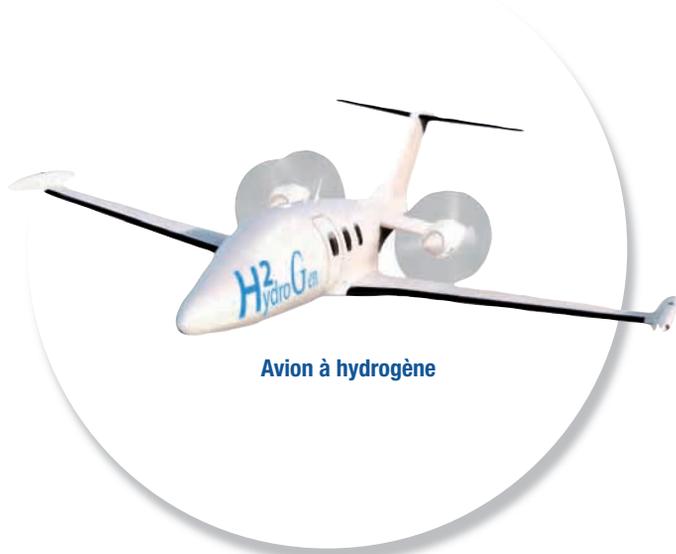
une refonte architecturale et le développement tous azimuts de briques technologiques transversales

Dans le domaine de la conception des aéronefs, deux axes de recherche doivent être poursuivis de manière parallèle : le développement de nouvelles technologies intégrables sur tous les types d'appareils et une refonte de l'architecture de ceux-ci. La configuration classique des avions de transport est dictée par un principe de séparation des fonctions d'emport (le fuselage), de portance (la voilure) et de propulsion (les moteurs) permettant d'optimiser quasi individuellement chacun de ces sous-systèmes. Cette formule a probablement atteint son optimum et ne semble plus offrir qu'une marge de progrès limitée. Il est donc nécessaire de reprendre le problème dans son intégralité en recherchant désormais des gains d'efficacité dans l'imbrication des fonctions. Cependant, ce changement d'approche remet en cause l'organisation industrielle actuelle, dans laquelle chaque secteur (avionneurs, motoristes, équipementiers) jouit d'une relative autonomie. Il est donc probable que, d'ici à 2050, le paysage industriel et ses équilibres changeront de manière notable.

Évolution marquée d'un concept connu, le *BWB*, ou *Blended Wing Body*, illustre parfaitement la nécessité d'avancer d'un même pas en termes d'architecture et de technologies innovantes. Cette configuration permet un intéressant accroissement de la capacité d'emport à moindre coût énergétique (si toutefois il s'avère qu'un besoin pour des appareils de forte capacité demeure). Ses avantages aérodynamiques, alliés à une masse structurale intrinsèquement faible, permettent en plus d'espérer un fort gain sur la consommation. Le grand volume intérieur disponible peut être mis à profit pour une meilleure association passager/fret, mais également pour une intégration des moteurs dans la cellule. Même si la contrepartie peut être une maintenance moins aisée, cette solution conduit, par effet de masquage, à une réduction de traînée et de rayonnement acoustique (un aspect déterminant de la sensibilité des populations aux nuisances du trafic aérien). De plus, la diminution de la signature sonore passe par l'intégration – particulièrement aisée sur le *BWB* – de matériaux absorbants, notamment passifs. Encore faut-il pour cela que des efforts soient faits afin que leur efficacité ne nuise pas au rendement énergétique, qu'ils soient stables dans le temps et qu'ils ne complexifient pas de manière réhibitoire les opérations de maintenance. Les dispositifs actifs ont également un fort potentiel de croissance, en particulier pour le traitement des bruits à spectre étroit, dans une optique de réduction des niveaux acoustiques en cabine. Là encore, l'effort doit porter sur leur robustesse et leur vieillissement.



BWB à propulsion électrique



Avion à hydrogène

En poussant un peu plus loin le concept du *BWB*, il est possible de repenser la propulsion par étapes. Un premier pas pourrait être la séparation des fonctions, entre génération de puissance et effet propulsif, conduisant à envisager une propulsion répartie à même d'apporter un gain aérodynamique supplémentaire. Le contrôle individualisé des moteurs contribuerait au pilotage, en remplacement ou en complément des gouvernes conventionnelles, associées à des dispositifs de déviation de jet et au contrôle actif des écoulements. Le pilotage de la géométrie des surfaces, *via* des *MEMS* pour des petites déformations, ou des matériaux adaptés, souples et tolérants au vieillissement, est une voie importante d'optimisation énergétique dans les différentes phases de vol. Sans oublier un effet bénéfique potentiel sur la réduction des sources acoustiques. Pour cela, il faut à la fois pousser les recherches sur les matériaux intelligents (*smart materials*), le vieillissement des matériaux de manière générale, les capteurs adaptés et le traitement des informations (nombreuses et à haut débit), ainsi que sur les actionneurs répartis permettant le pilotage par gouvernes distribuées. Sans oublier de s'assurer de la fiabilité de ces systèmes... Ces efforts devraient être menés à un point de maturité susceptible, *via* l'étude de concepts intégrant ces technologies, d'établir le compromis entre la masse globale de ces dispositifs, leur gain aérodynamique et la complexité qu'ils engendrent.

Mais on peut aller plus loin en termes de propulsion ; jusqu'à l'adoption de nouvelles sources d'énergie. L'objectif consistant, sur ce plan, à parvenir à une neutralité en matière de rejet de CO_2 , est envisageable. Il y a plusieurs manières d'y parvenir, Soit par le recours à une énergie intrinsèquement neutre de ce point de vue, comme le solaire ou le nucléaire, soit par l'utilisation d'une source intermédiaire ne rejetant pas de CO_2 comme l'hydrogène. Le développement de techniques de production de ce gaz à même de limiter ces rejets, par ailleurs facilement captables, permettrait d'atteindre un bilan équilibré. Il faut donc développer ces solutions de production et poursuivre notamment l'effort sur toutes les technologies permettant l'utilisation de l'hydrogène comme carburant à bord d'un aéronef : mise en froid, tenue aux basses températures, réservoirs structuraux isolants et de faible masse. Enfin, la neutralité en émission de CO_2 ne doit pas s'accompagner d'une forte augmentation de rejets d'autres polluants comme les composés soufrés.

Si l'utilisation d'un générateur électrique, entraîné par un turbomoteur à hydrogène, pourrait alimenter un grand nombre de moteurs électriques à haut rendement, l'efficacité globale du système suppose de s'appuyer sur des liaisons reposant sur des supraconducteurs. En réduisant les pertes par effet Joule, ils contribueraient en effet à augmenter la puissance massique des moteurs et à accroître la capacité de l'électronique de puissance associée. L'effort de recherche doit donc également porter sur ces matériaux. L'utilisation des moteurs électriques sera évidemment à considérer en termes de compromis énergétique et environnemental, dont on peut penser qu'il conduira à une mise en œuvre initiale sur des appareils de faible capacité. Toutefois, les progrès dans ce type de propulsion ne seront intéressants que si le bilan global, sur l'intégralité de leur cycle de vie (et c'est tout aussi vrai pour l'aéronef dans son ensemble), est en accord avec les objectifs imposés par le scénario considéré.

Cela inclut des dispositifs de stockage d'énergie conjuguant haut rendement et capacités de recyclage.

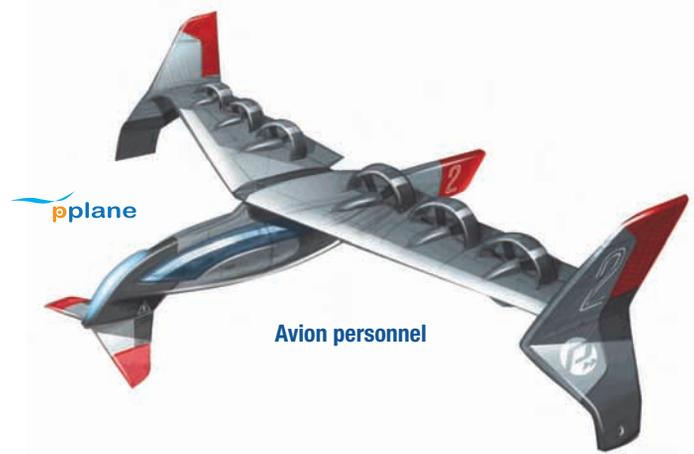
Le *BWB* n'est pas l'unique configuration sur laquelle miser. On peut en effet envisager des trisurfaces, des appareils utilisant des voilures haubanées, ou encore à l'allongement infini. Par exemple, l'aile rhomboédrique peut, sur une architecture permettant la séparation des fonctions, conduire à des gains aérodynamiques non négligeables par suppression des tourbillons marginaux. La structure interne découlant de cette formule est toutefois complexe. D'où l'intérêt de miser parallèlement sur certaines technologies innovantes qui, dans le domaine du contrôle de la souplesse d'éléments de structure comme la voilure, permettraient de mieux maîtriser les efforts. L'appareil bénéficierait ainsi d'une réduction des marges de conception, donc *in fine* de sa masse à vide.

À ce titre, les matériaux composites mériteraient une attention soutenue. Leur tenue face aux dégradations locales, notamment, est un souci majeur vu les risques pour la sécurité des appareils et, par effet induit, les marges de conception qui en découlent. Une meilleure surveillance de ces structures, à l'aide de capteurs miniatures, est donc nécessaire. Enfin, explorer plus avant les composites à base de fibres de bois serait pertinent.

En matière de propulsion, il existe des concepts de nouvelle génération fondés sur des hélices rapides éventuellement contrarotatives. Leur intérêt énergétique doit, là encore, être mis en perspective de leur bilan environnemental et sociétal. Il en est de même du côté des sous-systèmes, où des progrès sont envisageables autour de certains organes essentiels comme le train d'atterrissage. Seule une analyse multidisciplinaire pourra valider l'intérêt de ces technologies par une bonne estimation du taux d'échange qu'elles ne manqueront pas d'avoir avec les performances des appareils en matière de consommation et de rejet de polluants atmosphériques.

L'innovation viendra également de l'exploitation de voies connues mais à l'intérêt encore limité et que le franchissement de certaines barrières technologiques rendra plus opérationnelles, même si leur emploi reste cantonné à une niche. Les dirigeables, par exemple, qui pourraient – à la manière de satellites, mais positionnés à basse altitude – offrir une stationnarité sur zone intéressante, notamment en matière de relais de communications ou de surveillance depuis la troposphère ou la stratosphère.

Il n'est pas non plus exclu que des ruptures technologiques majeures offrent, à un moment ou à un autre, l'opportunité de reconsidérer le problème du vol sous un jour nouveau. Ce serait par exemple le cas si l'on parvenait à des solutions de sustentation alternatives qui permettraient, par exemple, de donner une impulsion déterminante au concept de *PAT (Personal Air Transport)*. À défaut, il est parfaitement envisageable que ce type de véhicule individuel s'appuie sur le vol aérodynamique classique, pour peu que sa motorisation limite les nuisances sonores générées par une utilisation au cœur des villes et sa consommation énergétique, c'est-à-dire qu'il soit électrique. D'ailleurs, comme



Avion personnel



Hélicoptère personnel



Dirigeable solaire troposphérique pour la surveillance

le laisse penser l'évolution technologique, le PAT pourrait bien être le premier à profiter des progrès réalisés dans ce type de propulsion, avant les appareils plus gros porteurs auxquels ils sont destinés, mais pour lesquels la faisabilité du tout électrique est plus difficile à démontrer. A ce titre, la propulsion hybride représenterait une étape intéressante pour le développement et la fiabilisation de la propulsion électrique (voir page 18).

Enfin, quel que soit le type de vol, il ne faudra pas oublier de protéger tous ces aéronefs, et pas forcément par le biais d'une action militaire directe. La sécurité du transport doit pouvoir, en fonction de la menace présente (terroriste par exemple), s'appuyer sur des dispositifs d'autoprotection défensifs issus du domaine militaire.

Cette profusion de technologies impose une approche multidisciplinaire et multicritère. Les nouveaux compromis imposés, les effets asymptotiques relevés aujourd'hui sur certaines des configurations d'appareils, imposent en effet que soient modélisés et intégrés tous les phénomènes couplés qui réapparaissent et dont seule la maîtrise permettra de tirer la quintessence de ces concepts. ■



Contrat 4D et automatisatisation

des algorithmes de calcul performants et les moyens de fiabiliser le système

En termes de procédures, il y a beaucoup à gagner sur la mise au point des trajectoires vertes et du *contrat 4D*. En particulier dans un monde où la sensibilité au respect de l'environnement est de plus en plus forte, où la saturation du ciel devient problématique et où l'énergie est chère. Dans ce cadre, la nécessité de suivre au plus près des trajectoires optimisées, fortement génératrices d'économies d'énergie et de limitation des nuisances, ou pour maintenir une sécurité acceptable, est claire, sauf évidemment si le transport aérien commercial s'effondre. Des trajectoires plus précises autorisent également une limitation de l'espacement entre les aéronefs au bénéfice de la fluidité du trafic. C'est parfaitement faisable avec des technologies disponibles aujourd'hui. Les moyens de simulation permettant d'évaluer les plans de trajectoires (*contrats 4D*) sont à portée de main. Un effort important de réalisme de ces calculs (validation) doit cependant être fait, pour que leurs résultats convainquent les opérateurs (compagnies aériennes, etc.) qu'ils y trouveront collectivement leur compte. Ils devront en effet s'adapter, en termes de planning ou de flotte. Parmi les obstacles à lever dans cette évolution figure celui de la réalisation d'équipements dédiés aux nouvelles procédures. Il faudra en outre prouver la robustesse du système lui-même (tolérance aux pannes logicielles, matérielles ou de système) et montrer qu'il atteint des objectifs de performance précis, qui se déduisent notamment des *Key Performance Areas* de l'OACI : *Safety, Punctuality & Predictability, Capacity & Delays, Flight Efficiency, Cost-Effectiveness et Environmental impact*. Techniquement, le point le plus épineux des recherches à mener semble être la mise au point de solutions algorithmiques de calcul rapide et certifiable des *contrats 4D* optimaux.

Du point de vue de l'aéronef, le respect de contraintes de ce type dépend de la prise en compte fine des performances de l'avion, de la météo rencontrée et de l'état du trafic dans lequel il évolue. Du fait de leur échelle et de la quantité de paramètres impliqués, ces données sont particulièrement complexes. L'automatisation du calcul d'un plan de trajectoires, adaptées aux conditions du moment et optimisées selon des critères généraux et éventuellement particuliers à chaque opérateur, devient indispensable. Chaque appareil devra pouvoir réévaluer sa trajectoire au cours même de son exécution, pour faire face aux variations imprévues (et imprévisibles aux échelles concernées) des conditions météo et des trajectoires des autres aéronefs. Un pilote humain aurait le plus grand mal à être assez réactif et précis dans son estimation des





conditions et son suivi instantané de la trajectoire. Il faut donc automatiser les aéronefs et, ce faisant, transférer au système certaines tâches jusqu'ici dévolues à l'humain. Soit le pilotage proprement dit, mais aussi les communications avec le dispositif de gestion du trafic, la navigation et la gestion des imprévus. Parmi les avantages qui en découlent, figure l'augmentation de la sécurité par disparition des accidents dont la responsabilité incombait aux pilotes. De même, la prédictibilité du trafic est fortement améliorée, et les changements organisationnels pourraient entraîner des économies. En dernier lieu, les appareils, dépourvus de cockpit, sont plus simples à concevoir.

À bord des avions, l'automatisation passe par l'utilisation de *FMS (Flight Management System*, ou système de gestion du vol) capables de prendre en charge la mission dans son ensemble : du repoussage (*push back*) de la porte d'embarquement à l'immobilisation à proximité immédiate du terminal de destination, en passant par le roulage, le décollage, la montée, la croisière, la descente, l'atterrissage, etc. De plus, des moyens de communication numériques entre le système de gestion du trafic (en particulier un segment sol, lui-même automatique) et l'avion doivent être implantés. Par rapport à la situation actuelle, la mise en place de ces deux éléments suppose d'avoir effectué notamment le développement et la validation de logiciels permettant la conduite d'un vol dans son intégralité. Ceux-ci devront être capables de gérer de manière automatique les situations d'urgence, la communication avec le système de gestion de trafic et même d'interagir avec les aéronefs environnants. La validation de ces logiciels qui, pour des raisons évidentes, devront avoir atteint un niveau de fiabilité extrême, constitue un impératif supplémentaire.

L'autre pilier essentiel de l'automatisation est constitué par les liaisons de données. Elles devront être très performantes, aussi bien entre les différents avions situés dans une même zone du ciel, qu'entre les aéronefs et le segment sol. Enfin, il faudra former et assurer l'entraînement des hommes qui ne disparaissent pas du dispositif. En effet, la présence d'un personnel technique à bord des avions sera probablement nécessaire, en particulier pour vérifier l'intégrité du système, assurer la réparation de certaines pannes non critiques, etc.

En plus de ces efforts techniques, la mise en place de l'automatisation suppose de résoudre certaines questions techniques et de société. Au chapitre des premières, figure principalement celle de la transition entre le système actuel et un dispositif automatisé, période critique où les aéronefs ne seront pas tous au standard. C'est là, sans aucun doute, l'aspect le plus délicat de cette évolution. En termes sociétaux, on se trouve face à un bouleversement culturel consistant, pour les passagers, à accepter de voyager à bord d'avions sans pilote humain. Mais cela demeurera-t-il un obstacle dès lors que le système aura démontré sa fiabilité ? L'obtenir, et en faire la preuve dans tous les cas de figures possibles, suppose bien entendu de mobiliser les moyens nécessaires. Enfin, il restera à déterminer quelles sont les responsabilités juridiques à l'œuvre. ■



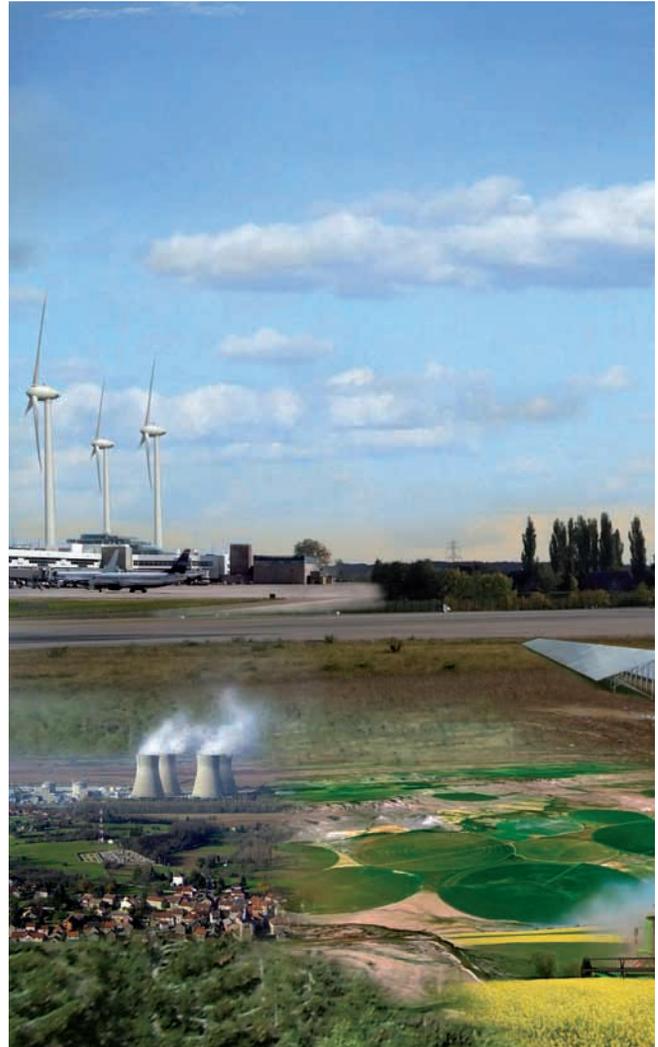
Infrastructures aéroportuaires

une logistique optimisée... qui devra
tenir compte des phases de transition

Il faudra également que nos plates-formes aéroportuaires soient neutres en rejets polluants, notamment de CO₂. Cela suppose une intégration de la notion de développement durable dès le stade de la conception, à la fois en termes de coût, d'énergie, de pollution et bien entendu de recyclage. Une part importante de la problématique est commune avec l'architecture urbaine ou industrielle. Notamment celle de la construction sans techniques ni matériaux « sales », mais aussi celle de la place de la plate-forme dans un réseau de transports modulaire incluant la route et le chemin de fer.

Il faut également régler le problème du fonctionnement de ces grandes structures et de leur approvisionnement : chaleur et climatisation (isolation), électricité, air, eau courante et marchandises. Il est possible d'envisager une production locale de l'énergie pour la plate-forme dans son ensemble, en bénéficiant des grandes surfaces disponibles et de l'éloignement du centre des villes. L'électricité peut ainsi être d'origine éolienne ou géothermique, ou être importée de centrales distantes. La répartition des portes d'embarquement selon les compagnies et les destinations doit être soigneusement optimisée sur les grands aéroports. Contrairement à ce qui est encore le cas à l'heure actuelle, les avions ne devraient plus avoir à parcourir une dizaine de kilomètres de taxiways pour rejoindre la piste. En termes d'ergonomie pour les usagers, on peut imaginer des solutions du côté de la conception des appareils avec, par exemple, l'embarquement de modules passagers intégraux, ou, avec le *BWB* notamment, une répartition plus optimale de la charge utile entre personnes et marchandises.

Tout cela nécessite également une adaptation des terminaux. Côté piste, des tracteurs automatiques peuvent se charger d'amener les aéronefs jusqu'aux seuils de piste, pour réduire la durée de fonctionnement des moteurs en régime réduit, le plus polluant, ainsi que la masse de carburant à embarquer. Pour la même raison, on considérera les technologies d'assistance au décollage comme la catapulte ou les décollages en pente. Le but est ici d'alléger le poids mort au profit de la charge utile, mais également d'utiliser l'énergie de manière rationnelle : les recherches actuelles de substitution aux carburants fossiles montrent que la contrainte d'en disposer sous une forme embarquable est forte. Le stockage ou la transformation thermique, mécanique ou électrique est beaucoup plus simple au sol où la masse et le volume des équipements n'importent pas de la même manière.





Co-modalité des infrastructures aéroportuaires

Aucune de ces possibilités n'est technologiquement révolutionnaire : la recherche à mener concernera la conception de l'ensemble et l'optimisation de sa logistique. En ce domaine, le recours à des simulations poussées sera déterminant : les investissements nécessaires à l'industrialisation et au déploiement sont en effet trop lourds pour être réalisés sans démonstrations convaincantes des gains permis.

La standardisation représente, ici encore, un obstacle à surmonter. Il est par exemple vraisemblable que l'assistance au roulage ou au décollage demandera une adaptation des aéronefs, ainsi que des procédures et de la formation pour les pilotes. Or, équiper en une seule fois toute la flotte n'est pas réaliste. Il faudra donc permettre la coexistence en opérations des modèles nouveaux et anciens, le temps du remplacement progressif de ces derniers.

Quant à la question de savoir lequel, du réseau point-à-point ou du *hub & spokes*, l'emportera, il semble qu'à l'échelle de l'Europe, l'avenir soit acquis à un système mixte, relativement proche du second : les distances moyennes entre grands centres urbains font en effet que la durée d'une liaison ferroviaire est souvent avantageuse, de porte à porte et à moindre coût. D'autant que les nuisances générées par les aéroports ne permettront pas leur implantation plus près des villes. L'argument énergétique – donc le prix du voyage pour l'utilisateur – joue lui aussi en faveur de la modularité des transports. Les recherches de solutions en la matière se feront essentiellement par modèles et simulations de « systèmes de systèmes » : l'organisation optimale est en effet peu dépendante des détails des technologies de transport impliquées. Au-delà de l'habituelle contrainte économique, gérée par les acteurs (les collectivités pour les aéroports, les opérateurs pour les flottes et l'organisation des dessertes), les nouvelles contraintes globales (énergie, environnement) peuvent réclamer une approche plus conceptuelle au niveau continental que la relative auto-organisation qui a prévalu jusqu'ici. ■



Outils de conception et de validation

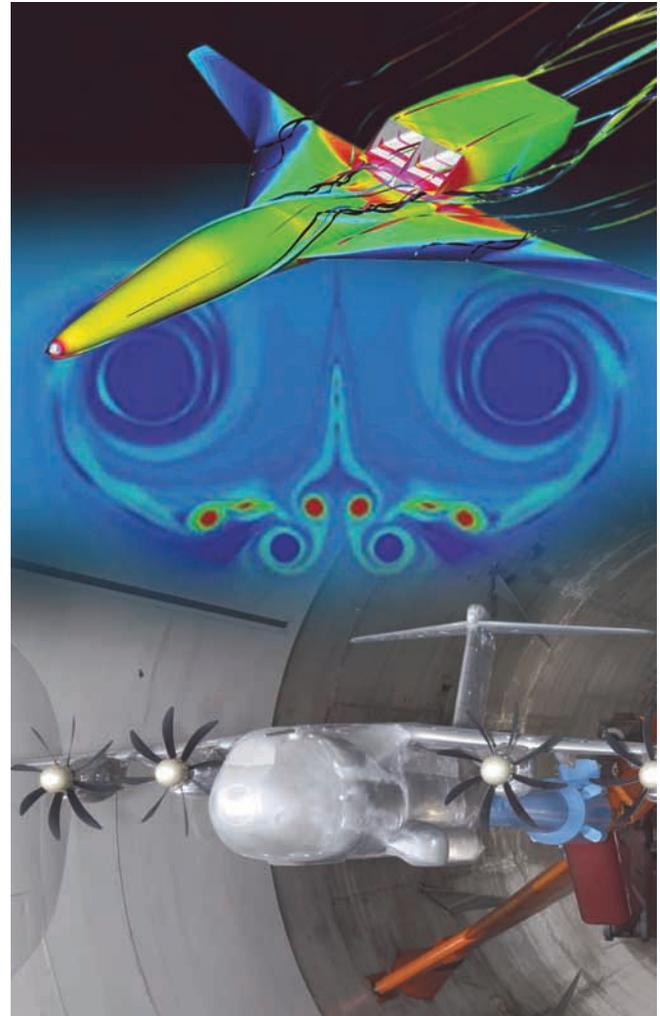
**une approche
multidisciplinaire
et multicritère**

Avec l'avancée des technologies, leur complexification, leur imbrication en termes d'effets qui imposent de les considérer globalement tant elles interagissent, le champ de développement des outils de conception est immense. À ceci s'ajoute la nécessité de prendre en considération des contraintes de plus en plus nombreuses, opérationnelles, réglementaires, sociétales, sur des configurations dont les composants sont en interactions plus fortes que jamais.

Dans chaque domaine scientifique (par exemple l'aérodynamique, la mécanique des structures, l'aéro-acoustique), les gains escomptés sont désormais subordonnés à la prise en compte de phénoménologies complexes, demandant un grand raffinement des modélisations et des capacités de calcul importantes. La modélisation présuppose une compréhension des phénomènes qui exige un gros effort en termes de recherche de base, mêlant théorie et expérimentation locale. L'intégration de ces phénomènes dans des approches numériques, essentielles pour la généralisation et la capacité à les mettre en œuvre dans l'analyse de systèmes complexes, suppose le développement de techniques de calcul parallèle et distribué pour profiter des capacités de l'informatique actuelle.

Mais il faut également développer des méthodes d'analyse et d'exploration pour aider les experts à comprendre et à tirer la quintessence de ces représentations nouvelles. À cette vision disciplinaire ou localisée de la conception, s'ajoute la dimension de l'interaction entre les disciplines du fait de la recherche d'optimums dépendant de phénomènes de plus en plus difficiles à observer et couplés. Leur obtention impose d'embrasser systématiquement toutes les disciplines en jeu, à un niveau de complexité élevé pour bien représenter cette richesse des modèles qui, seule, peut aboutir aux objectifs de performances recherchés.

Or, dans nos organisations actuelles, les compétences et les modélisations disponibles dans chaque discipline ou sous-système sont maîtrisées par des services spécifiques qui peinent à collaborer étroitement. Tout simplement parce que les cultures sont différentes et que l'on connaît mal les contraintes et la complexité des domaines voisins. Il faut rompre avec cet état de fait et proposer des méthodes et outils permettant de mener à bien cette approche de conception et d'optimisation multidisciplinaire et multiphysique.



Le champ de progrès est large. Il l'est du point de vue théorique, pour la définition de stratégies de conception robustes, fiables, permettant de gérer l'incertitude des modèles et de leurs données d'entrée. Mais il l'est également en ce qui concerne la capacité à obtenir des optimums globaux stables et peu sensibles aux dispersions naturelles des conditions d'utilisation, qu'elles soient opérationnelles où liées à l'environnement. Ces processus sont et seront très gourmands en capacités de calcul, de stockage de données, d'analyse en post-traitement pour l'aide à la décision. Ils feront encore plus appel à des calculs distribués sollicitant des débits d'informations importants et s'appuieront sur des outils de réalité virtuelle dont le développement sera par conséquent une priorité.

Enfin, les nombreuses briques technologiques ne sauraient être mises en œuvre sans avoir fait la preuve de leur validité réelle. Qu'elles concernent de nouveaux aéronefs, une organisation du trafic aérien repensée ou des procédures de vol inédites, il faut les évaluer au sein même du système global de transport aérien. Malheureusement, compte tenu de la complexité de celui-ci et des réglementations qui le structurent, réaliser un tel exercice grandeur nature et en conditions réelles est la plupart du temps impossible, à l'exception des technologies pour lesquelles les essais en vol sont réalisables (par exemple celles que met en jeu la mise au point d'une hélice, d'un équipement avionique, etc.). La simulation constitue donc le seul moyen de mesurer les bénéfices des nouveaux concepts. Or, les seuls outils d'évaluation de ce type existant sur étagère sont dédiés chacun à un unique critère de performance : bruit local autour de l'aéroport, bruit global au niveau d'un continent, émissions chimiques locales et globales, coût du trafic aérien, etc. Ils sont basés sur des données mesurées, des statistiques ou des lois semi empiriques. Ils s'appuient donc sur notre connaissance historique de l'aéronautique. Un héritage de la manière même dont ce secteur a évolué dans le temps, par petits pas, voire au coup par coup, au gré principalement de la survenue des accidents.

La tendance actuelle consiste à fédérer les outils d'évaluation existants en les réunissant dans une infrastructure unique. C'est le cas du projet français IESTA (Infrastructure d'Évaluation du Système de Transport Aérien) lancé par l'Onera, du projet européen Spade et du projet AEDT américain. On parle ici d'outils de simulation automatiques fonctionnant en temps accéléré ou contraint. Lorsque, en revanche, on étudie le fonctionnement opérationnel réel du système, notamment pour savoir comment il est impacté par les facteurs humains, on utilise des simulateurs temps réel faisant intervenir des hommes qui ont pour rôle de reproduire le comportement des véritables acteurs du système (contrôleurs, pilotes). Il existe aujourd'hui une dichotomie entre ces deux types de simulation pourtant complémentaires mais généralement pas reliés. Si le transport aérien évolue vers un système plus automatisé, donc plus déterministe, on pourra se diriger vers des modèles comportementaux plus simples tout en restant représentatifs, qui permettent un champ de modélisation à la fois plus souple et plus large. D'autre part, il existe, dans les applications de jeu en réseau, des simulations de sociétés virtuelles modélisant un grand nombre d'agents avec des comportements personnalisés basés sur de l'intelligence

IESTA (Infrastructure d'Evaluation de Systèmes de Transport Aérien)



artificielle. On peut donc imaginer, à terme, utiliser des simulations universelles d'un système complexe et complet, comme c'est le cas pour le trafic aérien dans son ensemble.

Reste que face à l'introduction de technologies révolutionnaires, les outils d'évaluation doivent être capables de prendre en compte des innovations dont nous n'avons encore aucune expérience. Il est donc nécessaire de revoir totalement la manière de concevoir ces dispositifs en s'appuyant sur des modèles fondés essentiellement sur les lois de la physique plutôt que sur la capitalisation de données et de statistiques historiques. Cela suppose d'une part d'être capable de modéliser toutes ces innovations mais aussi de le faire à plusieurs niveaux de complexité selon l'échelle où l'on se place. On en conçoit généralement trois : l'avion seul, le trafic au voisinage des aéroports, le trafic global au niveau continental ou mondial. C'est la démarche qui a été choisie pour la plate-forme d'évaluation des nouveaux concepts de véhicules « verts » à concevoir dans le cadre du programme européen *Clean Sky*. Un pas important mais pas suffisant.

L'un des domaines vitaux où l'investissement devra être le plus décisif est la sécurité. C'est évidemment le premier critère de performance à considérer en aéronautique. Mais, paradoxalement, il s'agit de celui que l'on sait le moins bien évaluer à l'échelle du système de transport aérien. Aujourd'hui, on le fait *a posteriori*, à partir des comptes-rendus d'incidents et d'Airprox. Certains travaux de recherche ont pour piste d'évaluer *a priori* la sécurité à travers des indices de complexité du trafic. Hélas, il n'existe pas encore de méthode capable de prendre en compte non seulement les caractéristiques du trafic mais aussi l'ensemble des autres paramètres qui influent sur la sécurité : les conditions météo et surtout le plus difficile, les facteurs humains.

Enfin, comme des événements récents l'ont montré, le transport aérien est très vulnérable face aux actes de malveillance. Au point que leur répétition pourraient très bien entraîner sa disparition pure et simple. Il est donc de première importance qu'un effort massif dans la modélisation du fonctionnement du système permette de hiérarchiser les failles en jeu et de définir une démarche pour les réduire sur le long terme. Les dispositifs de simulation complète à grande échelle joueront un rôle en ce domaine, pour tester diverses situations de crise comme des attaques terroristes, voire même de prévoir des comportements ou situations auxquels on n'a pas pensé. ■

Notre vision des priorités

Le champ des domaines où faire porter les efforts de recherche dans les années à venir est large. Toutes les briques technologiques qu'ils sous-tendent sont importantes. Il y en a toutefois cinq pour lesquelles l'effort à fournir est particulièrement fondamental, tout simplement parce qu'au stade actuel, leur développement est encore faible. Il s'agit de l'**avion électrique**, des **configurations d'appareils innovantes**, de la **propulsion** et des **aérodromes neutres en CO₂**, ainsi que de l'**automatisation complète du trafic aérien**.



R e m e r c i e m e n t s

Orientation et animation
de la prospective et coordination éditoriale :
Antoine Guigon,
directeur du Centre de Prospective Aérospatiale (CPA),
Philippe Benhamou,
chargé de mission au CPA.

Propos recueillis par Laurent Rabier, journaliste.
Illustrations : Yannick Chosse - Poussière de Pixel,
PPlane Project Illustration : Antony Villain, Stéphane Janin - Speadbirds Team.
Mise en page : Philippe Bernou - Onera.

© Onera - Juillet 2010



ONERA

THE FRENCH AEROSPACE LAB