



HAL
open science

Un cockpit pour l'aviation du futur ? Par quel prisme de l'IHM approcher la question ?

Catherine Letondal, Laetitia Bornes, Jérémie Garcia, Alexandre Duchevet, Stéphane Conversy, Sylvain Pauchet, Dong-Bach Vo

► To cite this version:

Catherine Letondal, Laetitia Bornes, Jérémie Garcia, Alexandre Duchevet, Stéphane Conversy, et al.. Un cockpit pour l'aviation du futur ? Par quel prisme de l'IHM approcher la question ?. IHM'24 - 35e Conférence Internationale Francophone sur l'Interaction Humain-Machine, AFIHM; Sorbonne Université, Mar 2024, Paris, France. hal-04486637

HAL Id: hal-04486637

<https://hal.science/hal-04486637>

Submitted on 2 Mar 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

A cockpit for the aviation of the future? How should HCI approach this question?

Un cockpit pour l'aviation du futur ? Par quel prisme de l'IHM approcher la question ?

Un cockpit pour l'aviation du futur ?

Design systémique d'interactions dans un contexte incertain

Catherine Letondal, Laetitia Bornes, Jérémie Garcia, Alexandre Duchevet, Stéphane Conversy, Sylvain Pauchet, Dong Bach Vo*

ENAC - Université de Toulouse. prenom.nom@enac.fr

Cet article aborde les difficultés à engager des projets de design d'interaction dans le contexte aéronautique alors que l'avenir de ce domaine est incertain. Cette incertitude est double, avec la nécessité d'une part pour l'aviation de s'interroger sur son devenir dans un monde qui questionne les ressources disponibles et les impacts écologiques de l'aérien, et avec d'autre part l'actuelle activité de R&D vers les technologies vertes d'une industrie aéronautique qui souhaite sauver le secteur. L'article, pour illustrer ce problème, se propose de décrire un projet de design du cockpit du futur en germe dans une équipe d'IHM aéronautique, faisant face à cette double incertitude. Nous décrivons une approche à plusieurs échelles, celle du design d'interactions pour les pilotes, celle du design cockpit lui-même, et celles, plus systémiques, qui prennent en compte pour ce design les effets indirects et les transformations d'un système aérien qui soit compatible avec les limites planétaires, notamment sur le plan de la sobriété des usages. Ce projet propose une combinaison des méthodes classiques de la recherche en IHM avec de nouvelles approches en complexité, en accord avec le tournant actuel de l'IHM écologique.

Mots-clés additionnels : IHM, design d'interaction, écologie, aéronautique, interaction avec les automatismes, interaction avec l'IA, modalités d'interaction, design systémique, design spéculatif, sustainable HCI

Reference:

Catherine Letondal, Laetitia Bornes, Jérémie Garcia, Alexandre Duchevet, Stéphane Conversy, Sylvain Pauchet et Dong Bach Vo. 2024. Why does the subject immersed in a virtual environment not exist. Contribution to the epistemology of HCI. *IHM'24 : Actes étendus de la 35ème conférence Francophone sur l'Interaction Humain-Machine, March 25–29, 2024, Paris, France.*

* Place the footnote text for the author (if applicable) here.

1 INTRODUCTION

L'industrie de l'aéronautique est dans une phase d'évolution importante : vols plus propres, nouveaux types d'aéronefs, introduction importante de l'intelligence artificielle, automatisation, pour citer quelques aspects. La recherche en IHM aéronautique adresse la plupart de ces problématiques, en partenariat avec l'industrie à travers des programmes comme SESAR¹. Un premier problème qui se pose néanmoins est celui de l'architecture globale du cockpit de l'avion (de ligne) sur lequel il y a très peu d'informations du fait d'un contexte concurrentiel, et d'une volonté de maîtrise stratégique : quel cockpit pour la recherche en IHM ? Un second problème est le fait que, si l'industrie aéronautique déploie de nombreux efforts vers la décarbonation des vols, la sobriété, c'est-à-dire la diminution du trafic aérien, est moins explorée : se pose donc la question de l'influence que pourrait avoir un changement structurel des modalités de transport sur les aéronefs jusqu'à l'architecture du poste de pilotage, et des approches adéquates pour traiter cette complexité. Notre approche est de concevoir un cockpit de recherche dans un contexte en évolution, à la fois à partir de ce que nous connaissons des stratégies industrielles, mais aussi avec la nécessité de prendre en compte les limites planétaires et en explorant des scénarios prospectifs. La table 1 résume les niveaux de problématiques à adresser.

Table 1 : Niveaux de problématiques à envisager. Le niveau N-1 est un contexte pour le niveau N

<i>niveau</i>	<i>méthodes (et notre niveau de maîtrise des méthodes)</i>	<i>lien avec l'écologie</i>	<i>besoins</i>
design d'interactions	méthodes IHM, ingénierie (fort)	optimisation énergétique	des pilotes
design cockpit	design, ingénierie (moyen à fort)	optimisation énergétique, matériaux	des pilotes
représentations du système socio-technique et des pratiques du transport aérien du futur (niveau structurel/systémique)	design systémique, multidisciplinarité, intelligence collective, imagination prospective (de faible à fort)	respect des limites planétaires	de la société

Dans cet article, après un état de l'art rappelant l'impact de l'aviation sur le climat et le tournant écologique de l'IHM, nous décrivons une approche composite. Nous précisons d'abord quelques aspects du design d'interactions pour le cockpit à partir de nos projets de recherche, qui sont dimensionnant pour un cockpit du futur. Nous soulignons à partir de là les besoins d'un environnement, d'un cockpit de recherche, puis d'un cadre élargi permettant d'adresser des problématiques actuelles et futures du design IHM pour un transport aérien écologique. Comme le détaille la table 1, aborder ce cadre est complexe car il nécessite de formuler des objectifs nouveaux pour notre domaine, et d'adopter des méthodes nouvelles. Nous décrivons quelques-unes d'entre elles, que nous pensons applicables dans un projet de design systémique du cockpit du futur.

2 CONTEXTE AERONAUTIQUE ET ETAT DE L'ART

2.1 Aviation et climat : quels scénarios pour atteindre les objectifs de la COP en 2050 ?

L'aviation contribue à l'accroissement du réchauffement climatique classés en deux catégories [17]. D'une part, les effets CO₂ correspondent au renforcement de l'effet de serre induit par les émissions de CO₂, provenant principalement de la combustion et de la production du kérosène, et d'autre part, les effets non-CO₂, globalement aussi réchauffants (voir les précisions en annexe A1.).

Le référentiel aviation-climat établi par l'ISAE-SUPAERO propose un état de l'art de la littérature scientifique sur l'impact climatique de l'aviation et sur les leviers envisagés pour le réduire, et analyse des scénarios de transition du secteur aérien dans le cadre du respect de l'accord de Paris [17]. D'après ce rapport, les émissions de CO₂ peuvent être exprimées comme le produit entre trois termes, qui concernent l'efficacité (moteurs, structure aérodynamique, gestion

¹ <https://www.sesarju.eu>

des traînées), la décarbonation du carburant (électricité, hydrogène, biocarburants ...), et la diminution du trafic. L'une des conclusions de cette étude est que, à moins d'allouer une part très importante du budget carbone à l'aviation, le seul moyen significatif d'atteindre les objectifs des accords de Paris pour 2050 est la baisse du trafic aérien (voir aussi [38]), l'impact des scénarios technologiques, même les plus optimistes, s'avérant significativement plus faible (annexe A.2).

Les angles d'approche pour l'IHM sont à la fois sur la partie technique dans la mesure où l'efficacité et la décarbonation nécessitent des instruments de contrôle et de supervision (e.g. gestion des batteries, gestion de carburants nouveaux), et sur la partie sociétale (e.g. analyse et évolution des usages, conception d'outils pour soutenir de nouvelles pratiques). Un angle d'approche technique également exploré est celui des aéronefs comme le ballon dirigeable. Nous pensons que l'IHM est bien placée pour analyser l'aspect sociétal, et pour accompagner les changements de pratiques de déplacement, à condition de prendre en compte dans son ensemble le système socio-technique à ses différentes échelles, en adoptant une approche systémique (voir section 4).

2.2 Tournant écologique de l'IHM

La communauté Sustainable Human-Computer Interaction (SHCI) rassemble les efforts de recherche en IHM en vue d'un avenir plus durable. La SHCI s'est initialement structurée autour de deux axes : *sustainability in design*, c'est-à-dire la réduction de l'impact matériel des logiciels et du matériel, et *sustainability through design*, c'est-à-dire l'influence du comportement de l'utilisateur (persuasive design) pour réduire la consommation d'énergie [21].

Aujourd'hui, il semblerait que l'on assiste à un tournant écologique de l'IHM, et une démocratisation de la prise en compte des limites planétaires, avec la préconisation d'approches systémiques et de méthodes de design plus adaptées (annexe A.3). L'article TOCHI de Sharma, Kumar et Nardi [41], qui signe un tournant important dans le positionnement *politique* de l'IHM pour l'écologie (Neha Kumar est présidente de SIGCHI), propose en effet d'élargir les perspectives quant au rôle que peut jouer le domaine de l'IHM pour adresser la soutenabilité forte à travers un modèle de décroissance. Une approche multi-échelles est encouragée, ainsi qu'une ouverture de la multidisciplinarité du domaine à l'économie et à la politique (annexe A.3). C'est une approche analogue que nous décrivons à grands traits dans cet article et que nous développons dans la section 4, en proposant et en illustrant quelques méthodes et outils adaptés à une transition vers la soutenabilité forte du transport aérien.

3 DESIGN D'INTERACTIONS POUR UN CONCEPT COCKPIT

Avant d'aborder la dimension systémique de notre approche (section 4), il est nécessaire de préciser nos travaux en IHM aéronautique. Notre positionnement est actuellement en grande partie déterminé d'une part par des questions de recherche en IHM (e.g. IA, multimodalité) et mais aussi par les enjeux exprimés dans les appels à projets répondant à des stratégies industrielles, dont l'objectif d'augmenter la capacité tout en maintenant un haut niveau de sécurité et en essayant de répondre aux contraintes écologiques. Les problématiques de haut niveau qui se posent en IHM aéronautique aujourd'hui au niveau du design d'interactions sont 1) l'interaction collective étendue aux automatismes ou à l'IA qui permettent une réduction des opérateurs humains au prix d'une complexité nouvelle, 2) les modalités d'interaction pour de meilleures performances, 3) la gestion de l'énergie, ces trois thèmes étant fortement liés à un contexte de sûreté.

Automatismes et IA. L'introduction des automatismes dans le poste de pilotage introduit en effet de nouvelles problématiques comme la perte de conscience de la situation ou la complaisance envers les automatismes. Aujourd'hui, les avancées en intelligence artificielle et leur potentielles introductions dans les cockpits apportent cependant de nouvelles perspectives mais posent de nouveaux enjeux. En analysant le comportement ou même les données physiologiques des pilotes, les IA pourraient en effet apporter un nouveau support aux pilotes (annexe A.4.1). Un autre intérêt des automatismes est l'assistance au vol, comme nous l'appliquons notamment avec le projet Volta d'hélicoptère électrique (annexe A.4.2).

Collaboration et conscience de la situation. La collaboration entre opérateurs, notamment dans le cas du concept mono-pilote avec un assistant au sol [4] [32][2], mais aussi dans le cas d'un cockpit tactile [3], pose de nouveaux problèmes de conscience de la situation, qu'on peut traiter par des éléments de design interactif, mais qui nécessitent légalement une réflexion sur la configuration spatiale du cockpit qui favoriserait la perception visuelle.

Multimodalité, tangibilité. L'environnement visuel des pilotes est riche, ils doivent interagir avec les systèmes avioniques, monitorer l'état de fonctionnement de l'avion au moyen d'instruments ou d'écrans et contrôler l'environnement extérieur. Notre objectif est de repenser la conception des cockpits pour en faire des environnements multimodaux, incluant de façon intégrée différents stimuli (visuel, sonores, vibratoires ou tactile, changement de forme) et différents moyens de contrôles (geste, regard, parole, force), mais en intégrant les modalités de manière holistique (annexe A.5).

Aide à la gestion des carburants. Les technologies de production d'énergie alternatives aux moteurs à explosion ou aux réacteurs ne permettent pas pour l'instant d'obtenir des performances similaires en termes de puissance spécifique (pour les piles à combustible hydrogène par exemple) ou d'autonomie (pour l'électrique par exemple). Comme précisé en annexe A.6, le pilotage d'appareils de ce type nécessite donc des moyens plus importants pour permettre aux pilotes de contrôler cette énergie.

Plusieurs de ces thèmes de recherche nécessitent, on le voit, de repenser le cockpit que nous utilisons dans nos projets de recherche, ses fonctions, son architecture, ses instruments.

4 APPROCHES SYSTEMIQUES POUR PRENDRE EN COMPTE LE CONTEXTE DU TRANSPORT AERIEN DU FUTUR

En présence du dépassement des limites planétaires (fig 5.a) il nous paraît difficile aujourd'hui de dimensionner la conception d'un cockpit, sans une tentative d'analyse de l'évolution d'un transport aérien qui respecterait ces limites. Si les appels à projets abordent bien les dimensions d'efficacité et de décarbonation de l'aviation du futur, ils concernent en revanche très peu, à part certains projets financés par CORDIS [47], les aspects de réorganisation du transport qui découleraient d'une volonté politique de réduction du trafic aérien. Nous pensons que tous ces éléments de contexte sont cruciaux. Par exemple, il faudra peut-être pouvoir construire des plans de vol en fonction des énergies, avec des points de ravitaillement plus fréquents, des changements de type d'énergie, des contraintes écologiques comme l'évitement des traînées de condensation. Dans un contexte de forte multimodalité des transports [40], où on favorisera l'utilisation du train et où les aéroports seront multimodaux, il faudra peut-être des outils pour mieux supporter les connexions (les pilotes reçoivent aujourd'hui un message de leur compagnie pour lister les passagers en connexion et prendre les mesures nécessaires). Les segments de vol seront peut-être très longs, car moins rapides, induisant une sous-charge cognitive permanente, à part des situations de surcharge. De nouvelles fonctions poseront des problèmes d'interaction probablement différents, comme aujourd'hui l'introduction d'opérations de taxiing électriques (projet AEON [15]). On peut faire le choix d'anticiper les évolutions en fonction d'un futur souhaitable (pas tout à fait comme le projet ADAIR [46] d'un nouveau cockpit explorant des technologies requises d'urgence pour soutenir la croissance attendue du transport aérien).

Comme le soulignent Sharma, & al. [41] ce type d'analyse ne peut qu'être multi-dimensionnelle et à plusieurs échelles, avec, à titre d'exemple : les aspects environnementaux et sociaux liés à l'aviation (notamment en interrogeant le besoin de voler selon les contextes et les aspects de justice sociale), le futur de l'aviation en termes d'usages (la mise en place de quotas stricts sur les passagers pourrait par exemple changer radicalement l'usage et les raisons/conditions des voyages par avion), les aspects opérationnels et sociotechniques (comment les infrastructures, métiers et process de l'aviation pourraient évoluer), le déploiement (massif ou non) de nouvelles technologies de carburant et architectures avion, ainsi que la matérialité et les interactions dans le cockpit. Il s'agirait ainsi, pour appréhender le contexte futur dans lequel nous aurions à nous placer, d'articuler de manière multidisciplinaire les problématiques technologiques, économiques, écologiques, réglementaires et sociales dont ce futur dépend. Les projets que nous décrivons ici, s'ils ne

concernent pas tous le design du cockpit du futur, sont cités à titre d'illustration de méthodes qui pourraient s'y appliquer.

4.1 Étude des besoins de voler

L'étude des besoins de voler, étroitement liée à la fois à la justice sociale et aux nouveaux récits/usages, est charnière dans notre réflexion. Les méthodes d'étude des besoins sont familières dans le domaine de l'IHM, avec notamment les techniques d'entretiens contextuels [26]. Mais, en présence du dépassement des limites planétaires, ce sont les besoins fondamentaux qui deviennent prioritaires (voir annexe A.7), et on est aujourd'hui plutôt face à un besoin de rupture. Une démarche possible est celle de l'analyse des attachements telle que la proposent Hennion [24] et Latour [29]. Plutôt qu'une expression des besoins, on cherche les réponses, tout autant ancrées dans la pratique, à deux questions : en quoi tenons-nous au transport aérien (c'est-à-dire en quoi sommes-nous attachés à ce qu'il nous apporte) ?, et en quoi ce transport aérien nous tient-il (c'est-à-dire en quoi conditionne-t-il notre mode de vie) ? (voir annexe A.8)

4.2 Design systémique

La production d'un modèle quantitatif dynamique des effets directs et indirects d'un produit ou service permet de comparer plusieurs stratégies de design (qu'il s'agisse de l'échelle du produit/service, du business model, ou de réglementations à l'échelle du système sociotechnique). Nous travaillons sur une proposition méthodologique et un outil de modélisation collaborative [8] pour permettre aux designers et aux décideurs de prendre en compte plusieurs échelles de design [28] pendant leur processus de design et de décision (annexe A.9).

Un autre aspect du design systémique, conseillé par Sharma & al dans leur article sur IHM et décroissance, est celui du design multidisciplinaire en complexité. C'est ce qui nous amène par exemple à travailler avec des géographes pour envisager de comprendre la dualité entre mobilité et habitat à travers un outil de simulation (annexe A.10) ou à organiser des ateliers d'intelligence collective favorisant la *pensée complexe* [33] (annexe A.11).

4.3 Convoquer les imaginaires

La transition du transport aérien fait l'objet de nombreux articles et reportages dans les médias. Or, une des difficultés est justement de parvenir à sortir de ces représentations (fig. 1).



Figure 1 : Un homme est affairé à scruter le sol sous le lampadaire. Vous êtes intrigué par son comportement et l'interpellez : Mais que cherchez-vous ? Ben, mes clés répond-t-il. Mais êtes-vous sûr de les avoir perdues là ? Bien sûr que non, mais là, il y a de la lumière !

Les méthodes pour éviter la fixation empruntent à toute une panoplie, au-delà des méthodes de créativité utilisées dans le design d'interaction (e.g. [Buxton]). La recherche sur les études prospectives (*Future studies research*) offre des outils pour la projection vers des futurs probables et ouvrir les imaginaires vers des futurs possibles et désirables. Les *design fictions* sont une façon de représenter des futurs possibles et le *backcasting* vise à travailler à rebours pour construire des trajectoires qui mènent aux futurs souhaitables. Rob Hopkins [25] décrit comment mieux utiliser l'imagination (avec

entre autres l'importance de l'hippocampe, du jeu, du contact avec la biodiversité, de l'attention, de l'*ikigaï*², des mouvements du corps), illustrant son propos de nombreux projets concrets de part le monde. Ce qui nous intéresse à travers ces approches est d'anticiper le contexte du transport aérien futur qui conditionne le design des avions, et par extension celui des cockpits, des instruments de navigation et de supervision, et des interactions qui seront pertinentes pour eux. Nous décrivons en annexe deux types de projet : imaginer le futur du transport aérien avec des étudiants (annexe A.12), et explorer les cockpits d'avions alternatifs au sein de l'équipe IHM (annexe A.13).

5 DISCUSSION

La démarche exposée dans cet article pose plusieurs questions.

Une première question concerne notre hypothèse d'un lien entre écologie et design du cockpit : on peut en effet considérer qu'un avion se pilotera toujours de la même manière. Mais d'une part les instruments du cockpit ne servent pas qu'à piloter : ils sont aussi là pour assister le pilote dans la gestion de la mission, du carburant, des trajectoires, des communications avec le sol, etc. Nous partons de l'hypothèse que nous n'en savons pas assez sur le transport aérien futur et qu'il faut l'anticiper.

Si l'IHM a toujours tenu à prendre en compte les "contextes", ce qui devient impactant aujourd'hui est complexe, incertain, multisectoriel [10] et multi-échelle. Mais est-ce toujours de l'IHM ? Les chercheurs en IHM aéronautique, soucieux de la dimension humaine de la technologie, doivent-ils sortir de leur domaine classique d'intervention pour analyser des problèmes sociétaux, surtout à l'échelle planétaire comme cela est impliqué dans le cas du transport aérien, et réfléchir à la conception de solutions pour y faire face ? Parmi les actes de la conférence CHI figurent déjà depuis plusieurs années des publications de travaux de cet ordre [18] [37][22][7].

D'un point de vue technique, d'autres questions se posent : comment notamment gérer la tension entre d'une part le design d'interactions riches (multimodale, haptique, sonore, avec des feedbacks visuels sophistiqués) qui peuvent améliorer les performances et la sécurité, et d'autre part la fabrication des dispositifs [31] et la consommation énergétique nécessaire à la mise en œuvre de ces interactions. Comment arbitrer entre ces deux aspects ?

6 CONCLUSION

Cet article vise à susciter le débat sur des aspects complexes et incertains de l'IHM soutenable, au-delà de l'optimisation énergétique et des interfaces persuasives. En prenant l'exemple d'un projet de design dans le contexte aéronautique, ce sont deux types d'incertitude auxquelles on doit faire face : l'incertitude liée aux stratégies industrielles, et l'incertitude liée au climat. Les deux sont différentes, mais jouent ce même rôle de bloquer les perspectives. Tout contexte a ses contraintes, bien sûr, et c'est pourquoi nous pouvons suggérer que cet article puisse servir d'exemple des questionnements et des réponses qu'on peut tenter d'y apporter.

ACKNOWLEDGMENTS

REFERENCES

- [1] Elliott Audry, Jérémie Garcia. Congruent audio-visual alarms for supervision tasks. ICAD 19, 25th international conference on auditory display, Jun 2019, Newcastle, United Kingdom. hal-02135341
- [2] Maxime Bardou, Catherine Letondal, Mickaël Causse, Jean-Paul Imbert, Mathieu Poirier. Design orienté collaboration à distance pour supporter la

² Une philosophie née au Japon et dont le principe est de trouver sa « raison de vivre » via une réflexion profonde, sincère et pertinente sur soi et sur le monde autour de soi.

- mutual awareness dans le cadre du Single-Pilot Operation. 2023. (hal-04014994)
- [3] Becquet V, Letondal C, Vinot JL, Pauchet S. How do Gestures Matter for Mutual Awareness in Cockpits? Disclosing Interactions through Graphical Representations. Proceedings of the 2019 on Designing Interactive Systems Conference 2019 Jun 18 (pp. 593-605).
 - [4] Maggie Berg and Barbara K. Seeber. 2016. *The Slow Professor: Challenging the Culture of Speed in the Academy*. University of Toronto Press.
 - [5] Bilimoria, K. D., Johnson, W. W., & Schutte, P. C. (2014, July). Conceptual framework for single pilot operations. Proceedings of the international conference on human-computer interaction in aerospace (pp. 1-8).
 - [6] Bureau d'Enquêtes et d'Analyses (BEA). (2012) Rapport final, accident survenu le 1er Juin 2009, vol AF447 Rio de Janeiro - Paris. Retrieved from <https://bea.aero/docs/2009/f-cp090601/pdf/f-cp090601.pdf>
 - [7] Billings, C. E. (1996). *Human-Centered Aviation Automation: Principles and Guidelines* (NASA-TM-110381). <https://ntrs.nasa.gov/citations/19960016374>
 - [8] Laetitia Bornes, Catherine Letondal, and Rob Vingerhoeds. 2023. Understanding the Indirect Effects of Interactive Systems Within Systems of Systems. *INSIGHT* 26, 4: 18–21.
 - [9] Laetitia Bornes, Catherine Letondal, and Rob Vingerhoeds. 2023. Using a Quali-Quantitative Modelling Tool to Explore Scenarios for More-Than-Sustainable Design. Proceedings of Relating Systems Thinking and Design 12 conference (RSD12).
 - [10] Brelsford, Christa, and Andrew Jones. "Multi-Sectoral Urban Interactions: Fundamental Science Needs to Inform Pathways to More Resilient Communities in a Changing Climate." Proceedings of a workshop organized by the MultiSector Dynamics Community of Practice Working Group on Urban Systems. UC Berkeley (2021). Retrieved from <https://escholarship.org/uc/item/75b71620>
 - [11] Bremer, C, Knowles, B. and Friday, F. 2022. Have We Taken On Too Much?: A Critical Review of the Sustainable HCI Landscape. Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, ACM, 1–11. <https://doi.org/10.1145/3491102.3517609>
 - [12] Comber R, Rossitto C. Regulating Responsibility: Environmental Sustainability, Law, and the Platformisation of Waste Management. Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems 2023 Apr 19 (pp. 1-19).
 - [13] Conversy, S., Chatty, S., Gaspard-Boulinc, H., & Vinot, J.-L. (2014). 2014. The accident of flight AF447 Rio-Paris: A case study for HCI research. Proceedings of the 26th Conference on Interaction Homme-Machine, IHM 2014.
 - [14] Coskun, A., Cila, N., Nicenboim, I., Frauenberger, C., Wakkary, R., Hassenzahl, M., Mancini, C., Giaccardi, E., & Forlano, L. 2022. More-than-human Concepts, Methodologies, and Practices in HCI. Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems Extended Abstracts. CHI '22 ACM. <https://doi.org/10.1145/3491101.3516503>
 - [15] Cousy, Mathieu, Peyruqueou, V., Pierre, C., Cyrille, P., Vo, D. B., Garcia, J., Mihaela, M, Van, S., Sharpanskykh, A., Malte von Der Burg & Lanzi, P. 2022. AEON: TOWARD A CONCEPT OF OPERATION AND TOOLS FOR SUPPORTING ENGINE-OFF NAVIGATION FOR GROUND OPERATIONS. Toward Sustainable Aviation Summit (TSAS) 2022.
 - [16] Dehais, F., Peysakhovich, V., Scannella, S., Fongue, J., & Gateau, T. 2015. « Automation Surprise » in Aviation: Real-Time Solutions. Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, 2525-2534. <https://doi.org/10.1145/2702123.2702521>
 - [17] Delbecq, S., Fontane, J., Gourdain, N., Mugnier, H., Planès, T., & Simatos, F. (2021). Référentiel ISAE-Supaéro aviation et climat.
 - [18] Doggett O, Bronson K, Soden R. HCI Research on Agriculture: Competing Sociotechnical Imaginaries, Definitions, and Opportunities. Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems 2023 Apr 19 (pp. 1-24).
 - [19] Dong-Bach Vo, Sylvain Pauchet, Isabelle Jolly, Florine Simon, Anke Brock, et al. Tacilient: Turbulence resilient tactile icons for pilot feedback. CHI, ACM, Apr 2023, Hamburg, Germany. 10.1145/3544548.3580951. hal-04034252
 - [20] Duchevet, A., Imbert, J.-P., Hogue, T. D. L., Ferreira, A., Moens, L., Colomer, A., Cantero, J., Bejarano, C., & Vázquez, A. L. R. (2022). HARVIS: A digital assistant based on cognitive computing for non-stabilized approaches in Single Pilot Operations. *Transportation Research Procedia*, 66, pp 253-261. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.12.025>
 - [21] DiSalvo, C, Sengers, P. and Brynjarsdóttir, H. 2010. Mapping the landscape of sustainable HCI. Proceedings of the 28th international conference on Human factors in computing systems - CHI '10, ACM Press, 1975.
 - [22] Engelbutzeder P, Bollmann Y, Berns K, Landwehr M, Schäfer F, Randall D, Wulf V. (Re-) Distributional Food Justice: Negotiating conflicting views of fairness within a local grassroots community. Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems 2023 Apr 19 (pp. 1-16).
 - [23] Fadden, D. M. (1990). Aircraft automation challenges. In Abstracts ofAJAA-NASA-FAA-HFS Symposium, Challenges in Aviation Human Factors: The National Plan.
 - [24] Hennion A. Attachments, you say?... How a concept collectively emerges in one research group. *Journal of Cultural Economy*. 2017 Jan 2;10(1):112-21.
 - [25] Hopkins, Rob. *From what is to what if: Unleashing the power of imagination to create the future we want*. Chelsea Green Publishing, 2019.
 - [26] Holtzblatt K, Beyer H. Contextual design: defining customer-centered systems. Elsevier; 1997 Dec 8.
 - [27] M. C. Jackson. 2020. Critical systems thinking and practice: what has been done and what needs doing. *Systemist*, vol. 41, no. 1, pp. 31–61, 2020.
 - [28] Peter H. Jones. 2013. *Design for care: innovating healthcare experience*. Rosenfeld Media, Brooklyn, N.Y.
 - [29] Latour B. 1999. Factures/fractures: From the concept of network to the concept of attachment. *Res: Anthropology and aesthetics*. 1999 Oct 1;36(1):20-31.
 - [30] Letondal, C., Laplace, I., Druot, T., Bieder, C. and Pauchet, S. Approches alternatives pour penser et construire le futur du transport aérien : exemples

d'expériences pédagogiques.. Entretiens de Toulouse, Jean-Claude HIRONDE, Apr 2024, Toulouse (31000), France. (hal-04392416)

- [31] Letondal, C., Tabard, A., Bornes, L., Esteves, A., Hachet, M., Maquil, V., & Roudaut, A. 2023. Tangible Interaction and Industrial Degrowth. In HCI for Climate Change. Imagining Sustainable Futures. CHI 2023.
- [32] Matessa, M., Strybel, T., Vu, K., Battiste, V., & Schnell, T. 2017. Concept of Operations for RCO SPO (No. ARC-E-DAA-TN44254).
- [33] Max-Neef, M. 2017. Development and human needs. Development ethics. Routledge, 2017. 169-186.
- [34] Morin, E. Introduction à la pensée complexe. Média Diffusion, 2015.
- [35] Pauchet, S., Letondal, C., Vinot, J. L., Causse, M., Cousy, M., Becquet, V., & Crouzet, G. 2018. Gazeform: dynamic gaze-adaptive touch surface for eyes-free interaction in airliner cockpits. Proceedings of the 2018 Designing Interactive Systems Conference. 2018.
- [36] Pauchet, Sylvain, Vinot, J. L., Letondal, C., Lemort, A., Lavenir, C., Lecomte, T., & Crouzet, G. 2019. Multi-plié: A linear foldable and flattenable interactive display to support efficiency, safety and collaboration. Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. 2019.
- [37] Perovich IJ, Titcomb C, Hirsch T, Helmuth B, Harteveld C. Sustainable HCI Under Water: Opportunities for Research with Oceans, Coastal Communities, and Marine Systems. In Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems 2023 Apr 19 (pp. 1-16).
- [38] Raworth, K. 2022. Doughnut economics: seven ways to think like a 21st-century economist. Penguin Books, UK USA Canada Ireland Australia India New Zealand South Africa.
- [39] Sacchi, R., Becattini, V., Gabrielli, P., Cox, B., Dirnaichner, A., Bauer, C., & Mazzotti, M. (2023). How to make climate-neutral aviation fly. Nature Communications, 14(1), 3989.
- [40] Paul, A., Schmalz, U., Cook, A., Bolic, T., Zareian, E., Pilon, N., Pérez V, Gendrot C, Laplace I, Arich P. Future multimodal mobility scenarios within Europe. Transportation Research Procedia. 2023 Jan 1;72:1869-76.
- [41] Sharma, V., Kumar, N. and Nardi, B. 2023. Post-growth Human-Computer Interaction. ACM Trans. Comput.-Hum. Interact. 31, 1, Article 9 (February 2024), 37 pages. <https://doi.org/10.1145/3624981>
- [42] Silberman, M. S., Nathan, L., Knowles, B., Bendor, R., Clear, A., Håkansson, M., Dillahunt, T. and Mankoff, J. 2014. Next steps for sustainable HCI. Interactions 21, 5: 66-69.
- [43] Soden, R., Pathak, P., & Doggett, O. (2021). What We Speculate About When We Speculate About Sustainable HCI. In ACM SIGCAS Conference on Computing and Sustainable Societies (COMPASS). COMPASS '21: ACM SIGCAS Conference on Computing and Sustainable Societies. ACM. <https://doi.org/10.1145/3460112.3471956>
- [44] Vo, Dong-Bach, Pauchet, S., Jolly, I., Simon, F., Brock, A. M., & Garcia, J. 2023. Tactilient: Turbulence resilient tactile icons for pilot feedback. Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. 2023.
- [45] Wiener, E. L., & Curry, R. E. (1980). Flight-deck automation: Promises and problems. Ergonomics, 23(10), 995-1011. <https://doi.org/10.1080/00140138008924809>
- [46] ADvanced AIRspace Usability (ADAIR) project. <https://srl.mcgill.ca/positions/adair.html>
- [47] CORDIS : <https://cordis.europa.eu/project/id/891166>, <https://cordis.europa.eu/project/id/891287>

APPENDICES

Les annexes sont destinées à préciser les éléments et les exemples mentionnés dans l'article.

A.1 Aviation et climat

Les mécanismes qui lient aviation et climat sont précisés sur la figure N. Les effets non-CO2, au nombre de cinq, englobent tous les autres impacts climatiques de l'aviation. Certains sont réchauffants et d'autres refroidissants : au total, ils génèrent un réchauffement. Ils incluent les effets des effluents moteur hors CO2 (notamment NOx, suie et vapeur d'eau) ainsi que les effets dus aux cirrus induits par les traînées de condensation, traînées représentées sur la figure 2 par *Contrail plume* [17].

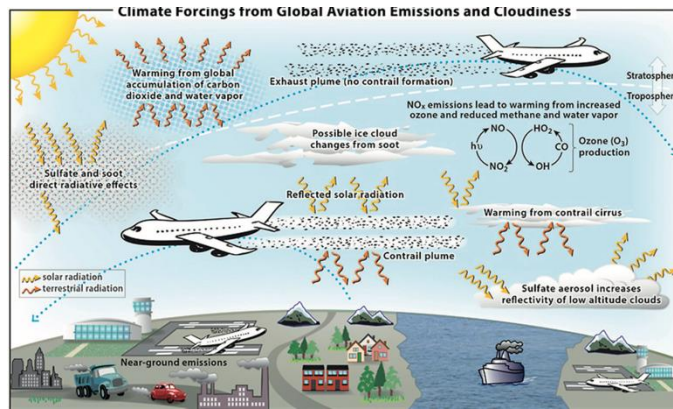


Figure 2. CO₂ et aviation [17].

A.2 Scénarios d'atteinte des objectifs de la COP pour 2050

La décomposition de Kaya offre un cadre conceptuel utile pour identifier les différents leviers à disposition d'un secteur d'activité donné pour diminuer ses émissions de CO₂. Adaptée au secteur aérien, elle peut s'écrire :

$$\underbrace{\text{CO}_2}_{\text{Émissions de CO}_2} = \underbrace{\frac{\text{CO}_2}{E}}_{\text{Intensité carbone}} \times \underbrace{\frac{E}{\text{Trafic}}}_{\text{Intensité énergétique}} \times \underbrace{\text{Trafic}}_{\text{Trafic}}$$

Les émissions de CO₂ sont ainsi exprimées comme le produit entre :

- l'intensité carbone : la quantité de CO₂ libérée par unité d'énergie (E) utilisée ;
- l'intensité énergétique : la quantité d'énergie (E) utilisée pour qu'un passager parcoure un kilomètre ;
- le trafic : le nombre total de kilomètres effectués par l'ensemble des passagers, exprimé en passager-kilomètre, noté pass-km

Alors que les deux premiers termes sont d'ordre technique, le dernier est d'ordre sociétal et dépendra d'évolutions politiques, économiques et culturelles.

- la diminution de l'intensité énergétique est un levier d'efficacité (moteurs, structure aérodynamique, gestion des traînées) ;
- la diminution de l'intensité carbone est un levier de décarbonation du carburant (électricité, hydrogène, biocarburants ...) ;
- la diminution du trafic est un levier de sobriété.

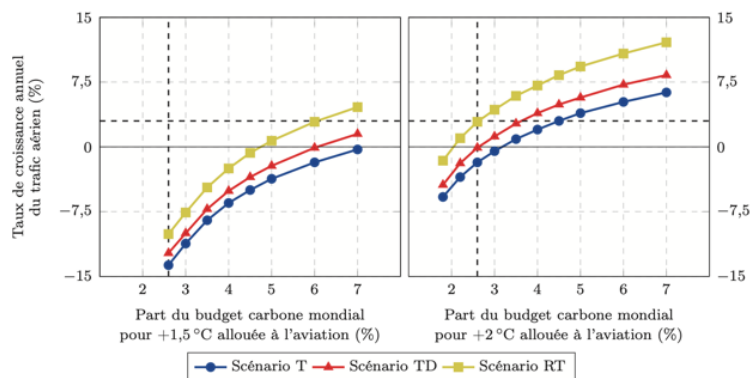


Figure 3. Taux de croissance du trafic aérien en fonction de la part du budget carbone mondial allouée à l'aviation commerciale pour les scénarios T, TD et RT. Lecture (figure de gauche) : si l'on alloue 3 % du budget carbone pour +1,5 °C au secteur aérien, alors le taux maximal de croissance du trafic dans le cadre du scénario RT vaut -7,5 % [17].

Plusieurs travaux scientifiques récents ont proposé des méthodologies pour évaluer la durabilité de scénarios pour l'aviation commerciale. L'analyse des scénarios est basée sur la notion de budget carbone. Le budget carbone représente alors la quantité cumulée maximale de CO₂ que l'humanité peut émettre dans l'atmosphère avant d'atteindre la neutralité carbone tout en limitant le réchauffement climatique sous une température donnée. Le référentiel aviation-climat considère principalement les budgets carbone mondiaux médians pour +1,5 °C et +2 °C, en tant que valeurs extrêmes de l'accord de Paris, et nous considérons des scénarios à horizon 2050. Trois scénarios technologiques illustratifs sont considérés : un scénario tendanciel sans décarbonation du carburant (T), un scénario tendanciel avec décarbonation partielle (TD) et un scénario avec rupture technologique et décarbonation totale (RT).

La figure 3 représente le taux de croissance durable du trafic aérien pour différentes allocations et pour trois scénarios d'évolution technologique, en considérant les budgets carbone médians pour +1,5 °C et +2 °C. Pour +1,5 °C, une allocation de 2,6 % du budget carbone mondial au secteur aérien (ligne verticale) implique une forte décroissance du trafic quelque soient les scénarios. Pour atteindre le taux de croissance tendanciel du trafic aérien de 3 % (ligne horizontale), il faudrait allouer au secteur aérien 6 % du budget carbone mondial dans le cas du scénario le plus ambitieux RT. Pour limiter le réchauffement à +2 °C, les résultats sont plus nuancés : le scénario le plus pessimiste T nécessiterait une baisse annuelle du trafic aérien de 1,8% quand le scénario le plus optimiste RT permettrait une croissance annuelle de 2,9 % dans le cas d'une allocation de 2,6%.

A.3 Tournant écologique en IHM

A la suite des premières approches en SHCI, de nombreuses initiatives, plus diversifiées et qualitatives, ont vu le jour. A partir de 2014, plusieurs membres de la communauté SHCI ont reconnu que ces efforts étaient insuffisants et ont appelé à une approche systémique pour aborder la complexité de la durabilité [42]. D'autres approches mobilisent des pratiques de co-design, de design spéculatif (*speculative design*) et le *more-than-human design*. Le *speculative design* [43] est une approche créative qui explore des scénarios futurs potentiels (possibles) afin de remettre en question les hypothèses implicites (généralement orientées vers un futur probable), pour stimuler le débat et aider à envisager des avenir désirables. Le *more-than-human design* [14] est une approche qui reconnaît que les êtres humains font partie de systèmes complexes et interconnectés et cherche à prendre en compte les relations entre les êtres humains et les entités non humaines (animaux, plantes, écosystèmes et technologies). Certaines voix au sein de la communauté SHCI appellent aujourd'hui à combiner ces approches à des actions plus concrètes et percutantes, compte tenu de l'urgence de la situation [Bremer et al., 2022].

Selon l'article de Sharma et al. [41], les objectifs à adresser selon cet article sont par exemple les effets rebond, l'obsolescence programmée, mais aussi l'exploitation des travailleurs par les technologies d'intelligence artificielle et de réseaux sociaux. L'article, partant d'un bilan de la croissance et de ses dégâts (sociaux, environnementaux), examine ce qu'implique la décroissance (ou la post-croissance, c-a-d une croissance équilibrée, stabilisée et inclusive pour les pays du sud : "steady-state economy which seeks equilibrium between population growth and production by maintaining a constant rate of material throughput"). Les idées proposées ont trait aux communs, aux besoins fondamentaux (ODD), à des seuils limite de pauvreté et de richesse, à la réduction de la recherche de profit, etc), avec un appel aux cultures des pays du sud (philosophie indienne par ex), en passant par les fablabs, etc. L'article recense les directions actuelles dans ce sens en IHM : réflexion sur les valeurs, réduction des usages du numérique, développement d'infrastructures locales, réflexion sur les effets indésirables de technologies en apparence cool pour n'en citer que quelques-uns. L'article conclut par des perspectives sur la nécessité de développer la culture économique en IHM (economic literacy), la nécessité de développer les outils pour soutenir les politiques de transition à toutes les échelles, la nécessité de questionner design et un design, de soutenir les solidarités, de développer la reconnaissance des limites et de cultiver une pédagogie critique. Les auteurs sont bien conscients des difficultés d'un tel programme pour les chercheurs du domaine, et proposent des solutions qui suggèrent de de publier moins, de ralentir, de développer une réflexion critique : "HCI academics are typically expected to publish early and often, making it more challenging to embrace post-growth philosophy, which requires time-consuming critical reflection and system development. But academia is meant to cultivate deep thought, discourse, and action; that is its true essence. Berg and Seeber [4] push for prioritizing "deliberation over acceleration" in academia, reminding us that academics "need time to think, and so do our students. Time for reflection and open-ended inquiry is crucial to what we do." HCI research can investigate models that nurture critical deliberation, discussion, and action, as the discipline of ecological economics has done. Together, we can look into establishing networks of peer support that permit slowing down, reflecting, and critically engaging with post-growth ideas."

A.4 Automatismes, IA

1. Réduction des opérateurs humains

Aux débuts de l'aéronautique, l'équipage avait l'entière responsabilité du vol à gérer, du pilotage de la machine à la gestion du carburant, en passant par la navigation. Puis, des automatismes ont été peu à peu implémentés et ont soulagé les équipages dans leur charge de travail, leur apportant du support dans le contrôle de l'avion, dans la récupération d'information et le management de la mission [23][7], en augmentant la sécurité, la fiabilité, les économies et le confort [45][7]. C'est ainsi que le cockpit est passé de quatre à deux membres d'équipage, le mécanicien et le radio navigateur disparaissant du poste de pilotage. Aujourd'hui, certains avancent que le pilote devient de plus en plus un gestionnaire de mission, les phases de pilotage manuel se comptant maintenant en minutes au début et à la fin du vol. L'équipage doit activement monitorer et comprendre les automatismes qu'il utilise sous peine de se faire surprendre par un comportement non anticipé [16].



Figure 4. Golden rules d'Airbus.

Concernant la perte potentielle de conscience de la situation, bien que des bonnes pratiques comme les "Golden Rules" d'Airbus (fig. 4) aient été diffusées pour la gestion des automatismes, de nombreux incidents et accidents récents ont été attribués en partie à la perte des automatismes et les confusions associées [6][13].

Bien que complexes, les comportements des automatismes sont malgré tout toujours explicables soit pendant le vol soit à posteriori. Le prototype d'assistant intelligent HARVIS [20] est un exemple d'implémentation d'une intelligence artificielle qui aide les pilotes dans la stabilisation de leurs approches d'aéroport. Grâce à un appareil d'oculométrie porté, HARVIS analyse les paramètres de vol que le pilote monitorise et l'avertit si une information est ratée par ce dernier. Malgré les aides qu'elles peuvent apporter dans le poste de pilotage, les IA basées sur du machine learning peuvent ne pas être transparentes et explicables. Elles peuvent être vues comme des "boîtes noires", leurs décisions ne pouvant être que partiellement expliquées que par l'entraînement qu'elles ont suivies.

2. Assistance au pilotage

Le pilotage d'hélicoptère sans assistance d'automatisme repose sur plusieurs sous-ensembles des membres inférieurs et supérieurs du corps : le sous-ensemble bras-main droite contrôle le pas cyclique des pales pour donner une direction à l'appareil, le sous-ensemble bras-main gauche tire le pas collectif des pales pour contrôler la portance (et donc son attitude verticale), le sous-ensemble main-poignet gauche tourne la "poignée des gaz" pour contrôler la vitesse de rotation des pales, et les pieds contrôlent l'attitude en lacet. Chaque mouvement de ces ensembles a une influence sur des paramètres que contrôlent les autres sous-ensembles : par exemple, tirer pour augmenter la portance a pour effet d'augmenter la traînée et de ralentir les pales, ce qui nécessite de la part du pilote une contre-commande d'augmentation de la vitesse du rotor. L'apprentissage du pilotage d'hélicoptère consiste à emmagasiner ces actions complémentaires afin de contrôler au mieux l'appareil, ce qui résulte en une sorte de "danse" corporelle essentiellement sensori-motrice, et épuisante cognitivement. Par ailleurs, une fois licenciés, les pilotes doivent constamment regarder dehors, tout en contrôlant les tours rotor et surveillant de multiples indicateurs de la "santé" de l'appareil, qu'ils soient instantanés (alarme) ou progressif (montée des températures). A la moindre défaillance, une action rapide est souvent requise afin d'assurer un poser compatible avec la survie des passagers. Nos démarches d'interview et de conception ont relevé le caractère angoissant de cette activité pour les pilotes de loisir. A ce titre, l'hélicoptère est un exemple parfait de système cyber-humain complexe, qui étend nos capacités jusqu'aux limites de nos capacités de perception/action/cognition.

Afin de faciliter le contrôle et le rendre plus sûr, plusieurs automatismes ont été introduits, notamment des "vis" physiques qui orientent le poignet et augmentent la vitesse rotor quand le bras tire sur le pas collectif, des systèmes de friction pour maintenir une valeur de pas collectif, ou des "governors" qui maintiennent une vitesse rotor. Le concept de Simplified Vehicle Operations (SVO) est une démarche générale visant à automatiser certaines parties de l'activité de pilotage et le rendre plus accessible, notamment en se reposant sur des capteurs qui permettent de collecter des informations sur l'attitude de l'appareil. Ces capteurs peuvent dysfonctionner (faux positifs, faux négatifs), et une partie des accidents récents résulte de la mauvaise coordination entre pilotes humains et automatismes dont le comportement est rendu erratique à cause de capteurs défaillants (probe-factor).

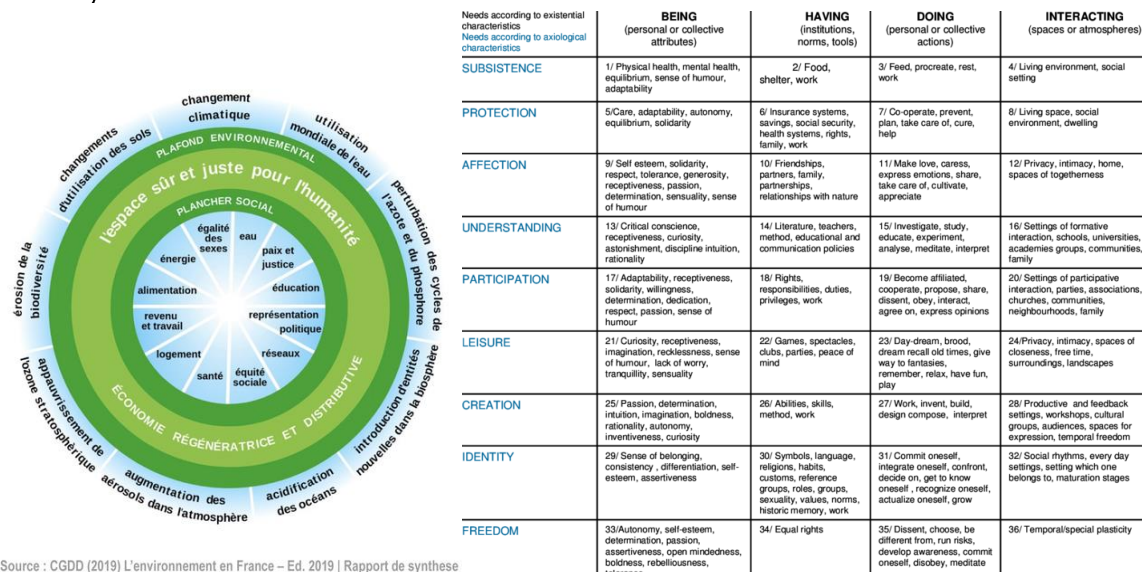
A.5 Modalités d'interaction

Quelques alarmes sonores existent, généralement d'un haut niveau de criticité : on peut les percevoir quelle que soit le lieu de l'attention visuelle. Cependant, au lieu de concevoir l'information visuelle et les alarmes sonores existantes comme des entités distinctes, notre approche consiste à intégrer plusieurs modalités en congruence afin d'informer plus efficacement le ou les pilotes, même dans des situations cognitivement complexes. Nous avons déjà mené des travaux sur la conception d'alarmes audio-visuelles congruentes [1] ainsi que des études sur l'amélioration de la distribution de l'attention visuelle par le couplage de la forme du support d'affichage avec le contenu affiché [36]. D'autre-part nous avons mis en évidence que la transformation de la forme de la surface d'interaction en entrée et en sortie permettait entre autres, d'améliorer la distribution de l'attention, de réduire les mouvements oculaires, d'améliorer la performance, de diminuer la charge cognitive [33][36]. Enfin, nous avons étudié mais aussi sur la perception de feedbacks vibrotactile, des icônes haptiques dans le cockpit sous conditions de turbulences [44] ou encore le changement de forme.

A.6 Interactions pour la gestion de l'énergie

Pour mieux gérer l'énergie, nous avons conçu des interactions qui vont au-delà de la simple indication aux pilotes de l'énergie restante. Les techniques de conception IHM ont permis de raffiner le besoin, notamment ceux de l'instruction au pilotage, pour nous aider à concevoir des interactions à base de manipulation directe sur tablette permettant d'explorer avant un vol les activités pédagogiques de pilotage sur une carte, les besoins énergétiques pour chacune de ces phases, de les présenter sous une forme de jauge à plusieurs segments pour chaque activité.

A.7 Analyse des besoins de voler : besoins fondamentaux



Source : CGDD (2019) L'environnement en France – Ed. 2019 | Rapport de synthèse

Figure 5. Limites planétaires et besoins humains : a) le modèle du Donut [38] et b) la matrice des besoins de Max-Neef [33].

A.8 Analyse des besoins de voler : analyse des attachements

Une des méthodes proposées pour l'analyse des attachements est la mise à l'épreuve : « pour savoir ce à quoi on tient, il faut l'éprouver et le mettre à l'épreuve » ([24], 179). Dans le contexte d'un stage effectuée sur 2023-2024 dans le cadre du Msc Design and Strategy for the Anthropocen, une enquête a été menée sur la façon dont les voyageurs ont vécu les pannes de transport aérien pendant la pandémie de COVID-19, conformément à la proposition selon laquelle les attachements à un système sont mieux définis et mesurés lorsque le système tombe en panne. Cela a permis de concevoir un processus qui permet à des non-experts d'imaginer collectivement ces futurs préférés en s'appuyant sur leurs propres

expériences en tant que citoyens et voyageurs. Une autre étude réalisée par un étudiant ingénieur de l'ENAC lors d'un projet a proposé d'analyser l'attachement des élèves ingénieurs à l'aérien avec un questionnaire réalisé à partir d'entretiens préalables.

A.9 Design systémique

Le design systémique [Jones, 2023] est une branche de recherche relativement récente née du croisement entre le design et la pensée systémique (ref). La pensée systémique (systems thinking) est une approche interdisciplinaire qui s'oppose au réductionnisme et étudie les phénomènes complexes par le prisme des systèmes et des interactions. Le design systémique cherche à développer des méthodes et des outils pratiques pour aborder des problèmes complexes par le design, en tenant compte de différentes échelles spatiales, sociales et temporelles.

Le prototype méthodologique de modélisation collaborative que nous développons, inspiré du design systémique (voir annexe A.9) et du Critical systems thinking [27], combine des méthodes et outils issus de plusieurs méthodologies de systems thinking, à la fois qualitatives (Soft systems thinking) et quantitatives (Hard systems thinking). Une partie de cette méthodologie consiste à produire collaborativement, avec des parties prenantes concernées directement ou indirectement par un produit ou service numérique, un modèle quantitatif dynamique des effets directs et indirects de ce produit ou service. Ce modèle, qui se concentre sur les ordres de grandeurs et dynamiques des impacts environnementaux, est à la fois moins coûteux et plus flexible qu'un jumeau numérique. En effet, plutôt que de chercher à représenter précisément l'état actuel d'un système sur la base de données temps réel difficilement accessibles, il cherche à représenter le futur de ce système en s'appuyant sur des hypothèses, des données historiques, et des données prospectives (par exemple au travers de sondages). La simulation de ce modèle permet de comparer plusieurs stratégies de design (qu'il s'agisse de l'échelle du produit/service, du business L'ENAC a développé un prototype d'outil de end-user modeling à cette fin [9].

Le prototype est actuellement mis en application sur un projet académique d'aéroport sur une île "écologique", dans le cadre d'un projet d'initiation à la recherche. L'idée est de proposer un modèle de mobilité évitant le plus possible la voiture et favorisant un avion régional électrique alimenté par des ressources locales (panneaux solaires ou éoliennes). Ce type d'autonomie requiert une surface de panneaux solaires de l'ordre du km² ou un nombre d'éoliennes de l'ordre de la dizaine d'unités. Le modèle permettra d'identifier, sur la base d'hypothèses et de données réelles, plusieurs scénarios possibles, et les ordres de grandeur des impacts environnementaux associés. Il s'agit, au travers de ces scénarios, de faciliter l'exploration de la faisabilité d'un tel projet, et de permettre une évaluation collaborative critique.

A.10 Projets multidisciplinaires

Articuler les dimensions économiques, sociales, technologiques et écologiques nécessite une réflexion multidisciplinaire. A titre d'exemple, nous travaillons aujourd'hui avec des chercheurs du Laboratoire Interdisciplinaire Solidarités, Sociétés, Territoires (LISST) à la construction d'un projet qui propose d'avancer sur une étude des besoins de mobilité aérienne avec un angle particulier qui a été peu exploré, celui des liens entre mobilité aérienne et territoire. Il s'agit, dans un esprit interdisciplinaire, de prendre en compte non pas seulement les besoins en déplacement, mais en même temps et comme un problème dual les besoins en habitat et en déplacements, ces derniers dépendant très fortement des premiers, et d'explorer les implications sur le développement des territoires. L'objectif de ce projet, à travers la conception itérative d'une représentation des composantes en interaction dans un tel système, est de parvenir à exprimer les leviers d'une transition écologique des territoires et de la mobilité, et d'en simuler la dynamique.

A.11 Ateliers d'intelligence collective

Un aspect fondamental des approches complexes, mis en avant notamment par Edgar Morin [33], est le développement des capacités à affronter collectivement les questions complexes, en partant du principe que cela est plus efficace qu'un travail individuel. Un atelier d'une journée, appelé "En'Action", impliquant environ 25 membres du personnel de l'ENAC, visait à « Tester, agir, penser en complexité » en expérimentant des approches systémiques pour appréhender des questions complexes, comme par exemple celle de la place de l'aérien dans la transition écologique. L'atelier avait été

préparé avec deux intervenants du master d'éco-ingénierie MSEI de l'INP. L'atelier alternait des moments de travail en sous-groupes sur un cas d'étude et des moments d'échange en groupe entier. Le cas d'étude qui était proposé était le chantier autour des enseignements pour la transition écologique dont il s'agissait d'analyser les dimensions complexes dans un cadre méthodologique laissant place à la réflexivité et à l'intelligence collective.

Un questionnaire post-atelier a montré que les participants ont apprécié cette expérience d'un temps riche qui a également permis d'envisager des pistes pour la suite du chantier transition écologique de l'ENAC. Ce qui ressortait principalement des retours comme le plus important, c'est le début de la construction d'une "intelligence collective" autour de ce type de questions. Ce qu'on peut comprendre à travers ce terme c'est l'émergence d'une confiance collective concernant les possibilités de construire et de se projeter dans la bienveillance, l'écoute, l'échange, la dialectique et la diversité, et ce, en intelligence c'est-à-dire avec la compréhension et l'apprentissage réciproques qui en résultent. La réflexivité était au cœur des ateliers, et deux observatrices notaient ce qui se passait pour en produire une restitution graphique (fig. 6).

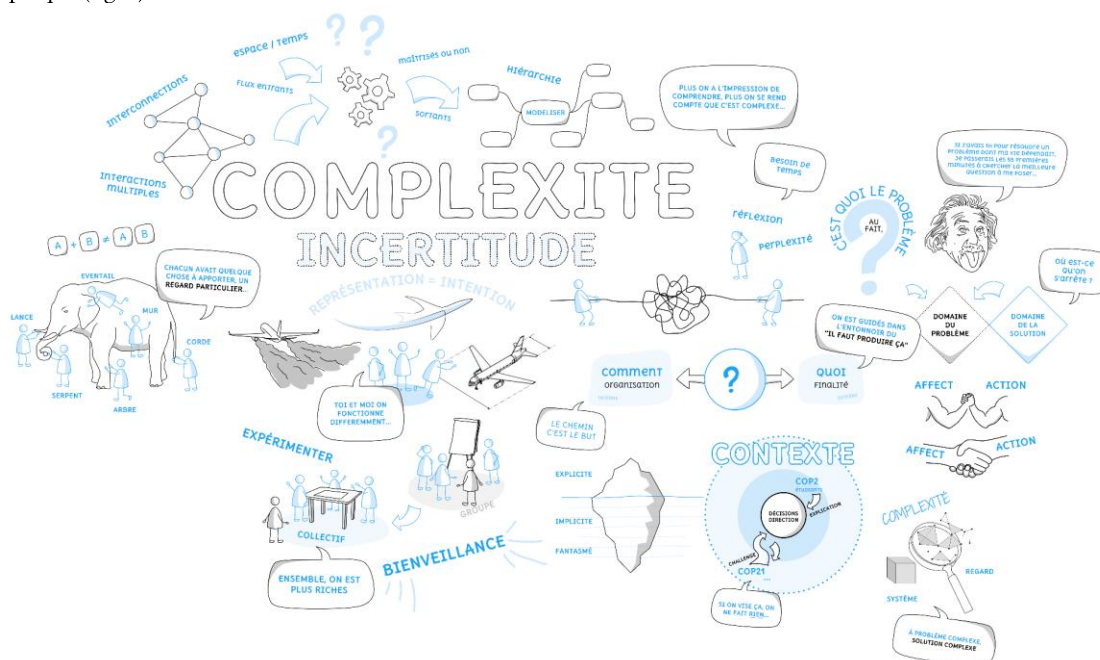


Figure 6. Réflexivité graphique sur le déroulement de l'atelier En'Action.

A.12 Expériences pédagogiques sur le futur du transport aérien

L'ENAC a mis en place depuis septembre 2021 une semaine Rentrée Climat et Enjeux Sociétaux pour tous les étudiant.e.s primo-entrants dont l'objectif est de transmettre un socle commun de connaissances et de stimuler des réflexions individuelles et collectives sur les enjeux de transition socio-écologique du transport aérien. Parmi ces enseignements, certains consistent à proposer et encadrer des projets dits "Projets Innovation Challenge". Depuis 5 ans, 1 ou 2 sujets par an ont été menés par des groupes de 1 à 4 étudiant.e.s ingénieur.e.s.

Dans ce cadre, le choix a été fait de proposer des sujets permettant aux étudiant.e.s non seulement de prendre conscience de la situation environnementale dans toute sa mesure, et de se poser par eux-mêmes des questions sur les impacts du transport aérien, mais aussi de construire par eux-mêmes, sous des formes diverses des représentations d'un transport aérien futur compatible avec les limites planétaires. L'objectif de ces projets est donc à la fois pédagogique, avec une initiation à des méthodes complémentaires à celles de l'ingénierie, mais aussi de créer un espace d'expression sensible intégrant les préoccupations citoyennes et collectives, la dimension émotionnelle, le désir, la créativité.

Les projets menés étaient par exemple : conception d'un aéronef habitable (une "aérocité") pour de longs voyages permettant d'effectuer de longues distances grâce aux vents ; conception d'un jeu de carte pour "sauver le transport aérien", conception d'une plate-forme multimodale bio-inspirée (fig. 7.a) ; ou encore concevoir des designs fictifs pour trois scénarios différents du transport aérien du futur (fig. 7.b).

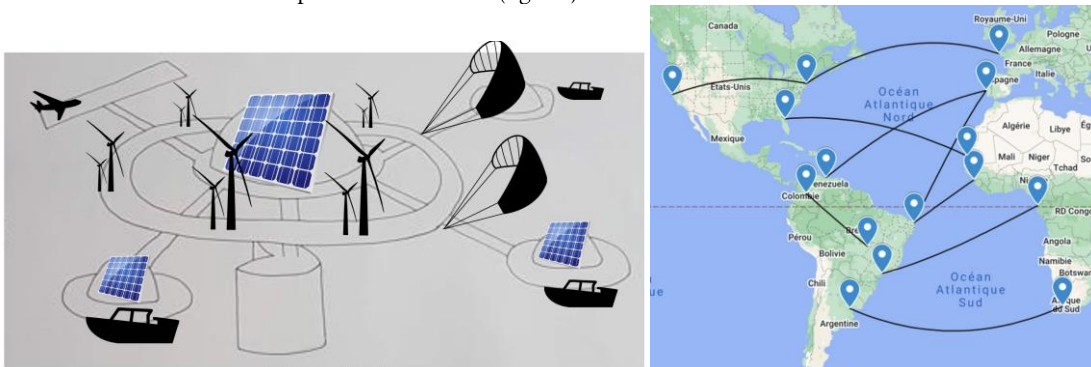


Figure 7. Projets pédagogiques. a) plate-forme multimodale aérienne et maritime bio-inspirée ; b) scénario d'une aviation raisonnée, avec des liaisons aériennes restreintes aux longues distances entre quelques hubs continentaux.

L'un des projets proposés consistait à évaluer le concept de low tech dans le domaine de l'aviation.

Afin de permettre aux étudiant.e.s d'aborder ces sujets complexes de manière ouverte, exploratoire et constructive, nous leur avons proposé d'explorer, en plus des méthodes de modélisation mathématiques et de simulation qu'ils devaient aussi utiliser, des approches différentes des méthodes d'ingénierie qui leur sont traditionnellement enseignées : méthodes issues du design, de la fiction, de la gamification, du nature inspired design avec ses fouilles biologiques permettant de s'inspirer des modes de transport dans la nature pour trouver des idées pour les humains, etc. Tous les groupes ont également pu participer à un cours sur de nombreuses méthodes d'innovation : 6 hats, C-K, ASIT, 9 screens, 5W1H, SWOT, Blue Ocean Strategy, matrices de découvertes, PPCO, SCAMMPERR, Lotus Blossom, etc. Certains projets ont amené les étudiant.e.s à effectuer des études de terrain sur les besoins de voyages écologiques longs à travers des interviews auprès de personnes ayant toutes effectué un voyage atypique. Les étudiants ont parfois utilisé des méthodes comme C-K pour réfléchir aux sources d'énergie, ou encore ASIT pour le stockage de l'énergie ou pour proposer le dimensionnement d'une "aérocité" en termes de nombre et taille de logements, de ressources (eau, ...), d'énergie, de volume d'hélium nécessaire, mais aussi d'activités culturelles requises.

Les projets ont été l'occasion pour les étudiants de mener par eux-mêmes un raisonnement non trivial de type scientifique et technique, et d'apprendre à modéliser et à calculer. Même si ces réflexions n'aboutissent pas nécessairement à un objet technique viable, elles permettent aux étudiants d'apprendre à se lancer et à être autonomes sur ces aspects. Enfin, les projets permettent aux étudiants de réfléchir au contexte politique et social de leurs propositions, réflexions parfois résumées dans un article qu'ils ont à rédiger.

A.13 Explicitation des imaginaires du futur, explorations

Dans le cadre de notre réflexion sur un "cockpit du futur" recherche, nous avons organisé quelques ateliers afin de commencer à expliciter nos représentations et exercer nos imaginaires.

Une première activité proposée était pour chacun de rédiger un bref récit illustrant la situation du transport aérien en 2050 dans le but d'explicitier et de partager nos représentations. Les récits évoquaient diverses situations (table 2).

Un assistant intelligent pour les pilotes privés qui peut se greffer aux instruments du cockpit pour entrer les données réelles du vol.

Lors du vol, les pilotes supervisent avec tous leur sens (vue, odorat, toucher, son) en ressentant les turbulences et les paramètres avion. Le contrôle aérien consiste à spécifier des contraintes prises en compte par les systèmes avion.

Un grand voyage de loisirs à bord d'un dirigeable où il est possible de découvrir l'histoire des régions survolées, de participer aux manœuvres (par exemple si on n'a plus assez de jours de vacances ou si le voyage dure plus longtemps que prévu).
Voyage collectif dans un bla-bla e-planeur de 10 personnes à propulsion mixte hydrogène/électrique pour visiter sa famille. La préparation du plan de vol, en fonction de la météo, est collaborative, mais si la situation n'est pas adaptée, le décollage peut être reporté.
Le transport des passagers se déroule en aérotrain, composé d'un aéro-tracteur (une locomotive volante) et de "bagons" (contraction de ballons dirigeables et wagons) (fig. 7 droite). L'embarquement dans les bagons est réalisé le toit de la plate-forme d'embarquement.

Table 2. Récits illustrant nos représentations personnelles du transport aérien du futur.

De nombreuses idées impactantes pour un cockpit ont émergé :

- comment construire des plans de vol avec des énergies pour ne pas tout faire d'une traite, avec des points de ravitaillement, des changements de type d'énergie, des contraintes de ressources, de conditions aérologiques
- des plans de vol pourraient passer par des points de contrôle et de vitesse, d'optimisation de consommation
- comment donner à voir ces informations, comment les manipuler, avec des meta-paramètres compréhensibles par le pilote - soutenu par un algorithme qui recalcule les trajectoires
- comment utiliser l'influence potentielle du vent dans le cas de ballons dirigeables, avec moins de degrés de liberté, comme pour des planeurs qui doivent rejoindre tel point pour prendre un courant ascendant
- comment gérer la multimodalité des transports, des opérations dans des aéroports multimodaux
- comment soutenir les pilotes lors de voyages très long, avec les ballons, induisant une sous-charge cognitive permanente, mises à part quelques situations de surcharge

Une deuxième activité a consisté en une représentation graphique de cockpits, qui soit (ou non) associés à ceux de ces récits de l'activité précédente (table 1) qui inspiraient les participants (fig. 8). L'idée de l'aérotrain a été reprise par plusieurs participants. Cette idée, bien qu'elle soit assez peu réaliste sur le plan physique, permet de concrétiser l'impact de nouvelles hypothèses sur le transport aérien futur sur le design du cockpit.

Ainsi, la suggestion d'une représentation tangible pour piloter et reconfigurer l'aérotrain à la demande a été explorée, avec un prototype physique qui réagit aux comportements mécaniques de l'aérotrain, avec les informations contextuelles en réalité augmentée. Un autre participant a suggéré la supervision des "bagons" et des passagers sur un itinéraire complet qui desservirait plusieurs villes à l'image d'un train où on peut monter en court de route et descendre en court de route (fig. 8 bas-gauche). Sur le dessin de la fig. 8 haut-droite les "bagons" sont représentés sous forme de comètes, cette représentation permet de surveiller l'altitude de tous éléments de l'aérotrain - c'est est une vue 3D qui permet aussi de monitorer les angles de roulis qui pourraient avoir un impact sur la structure de l'Aérotrain. D'autres participants ont proposé un concept de cockpit multimodal, dans lequel les pilotes ressentent les paramètres du vol en haptique ou en audio.

Une troisième activité a consisté à relire des thèmes émergents des idées des précédents ateliers, tels que la prise en compte des traînées de condensation, l'adaptation de la forme de l'avion à la vitesse et à la stabilité, le principe de fauteuils mobiles pour s'adapter aux vols en formation (moins consommateurs d'énergie), la consultation des passagers pour approuver un déroutement calculé par les algorithmes, la gestion d'un conflit 4D avec modalités d'interaction adaptées au niveau d'automatisation, etc. Il s'agissait ensuite de concevoir en petits groupes des storyboards sur les

thèmes qui avaient été sélectionnés. Un des scénarios décrivait une évolution du transport aérien mondial où il n'y avait plus qu'une dizaine de grands aéroports, tous les autres trajets devant utiliser le train.

Cette description d'explorations préliminaires laisse modestement imaginer l'impact d'un transport aérien organisé différemment sur le design du cockpit et des interactions humains-système à concevoir, ainsi que sur les design des outils collaboratifs entre contrôleurs aériens et pilotes, ou entre pilotes sol et aéronefs pour les avions automatisés.

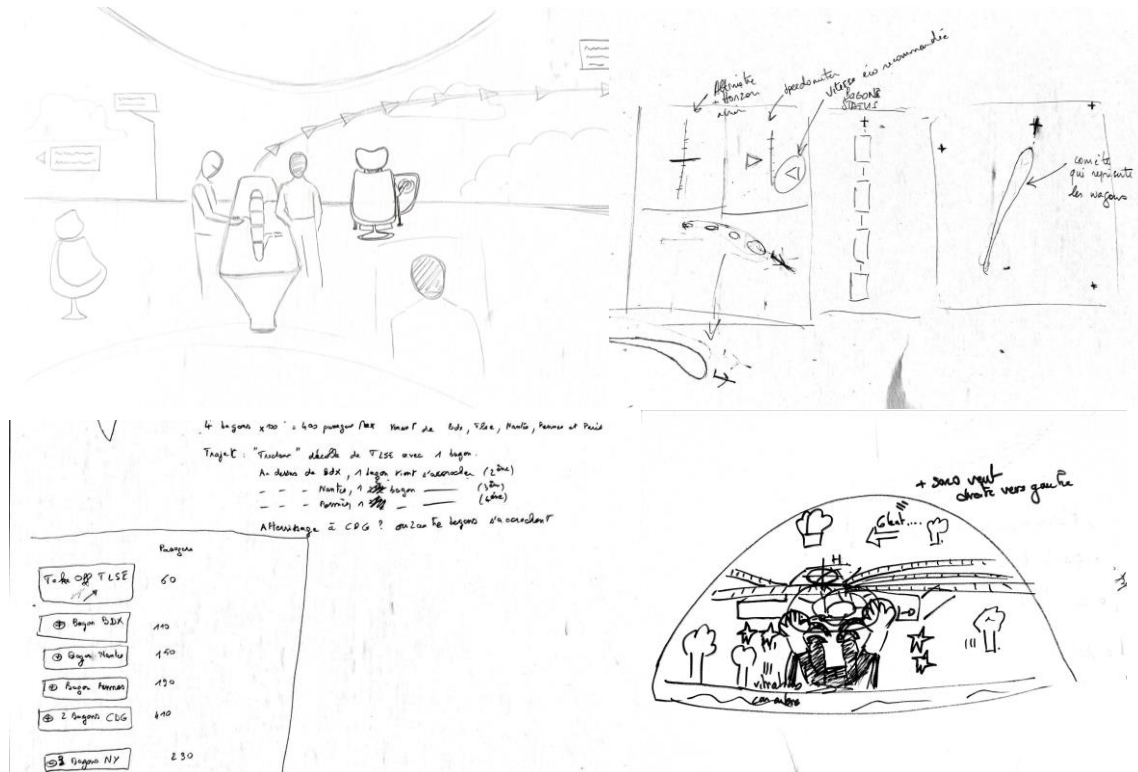


Figure 8. Exemples de dessins de cockpits réalisés en atelier, avec par exemple des outils pour superviser les "bagons" d'un aérotrain.