Le précédent du Tu-155 : un retour d'expérience instructif

Un démonstrateur unique au monde

À la fin des années 1980, le bureau Tupolev a modifié un avion de ligne Tu-154B (CCCP-85035) pour en faire le premier avion au monde à voler à l'hydrogène liquide, puis au méthane liquéfié (GNL). Le prototype, baptisé Tu-155, effectue son premier vol le 15 avril 1988 (vol de 21 minutes).

Les deux autres moteurs restaient au kérosène classique, tandis que le moteur latéral droit (un Kuznetsov NK-88) recevait le carburant cryogénique, stocké dans un réservoir de 17,5 m^3 installé dans la partie arrière du fuselage — au prix de la suppression de l'ensemble des sièges passagers, remplacés par les réservoirs et l'instrumentation d'essai.

Phase 1 — Le test hydrogène (LH_2)

Le Tu-155 réalise son premier vol à l'hydrogène liquide en avril 1988. Cette expérimentation, menée sur un avion converti et non conçu nativement pour ce carburant, met en évidence des contraintes physiques importantes :

- Température cryogénique extrême : -253 °C, nécessitant plus de 30 systèmes dédiés (isolation, purge, ventilation, sécurité).
- Volume colossal : l'hydrogène liquide occupe environ 4 fois plus de volume que le kérosène pour une énergie équivalente.
- Intégration impossible dans les ailes : les réservoirs cylindriques isolés doivent être installés en cabine, ce qui supprime tout l'espace passagers sur ce type de cellule.
- Infrastructure au sol lourde : camions cryogéniques dédiés, zones de sécurité, procédures spécifiques.

Ce que démontre réellement le Tu-155 sur l'hydrogène : non pas que l'hydrogène serait «impossible» en aviation dans l'absolu, mais que son intégration dans une architecture d'avion existante, par conversion, impose une refonte quasi complète de la cellule. C'est précisément pour cette raison que les projets actuels d'avions à hydrogène (Airbus ZEROe et équivalents, horizon 2035) ne sont pas des conversions d'appareils en service, mais des architectures nouvelles conçues dès l'origine autour du stockage cryogénique — blended wing body, réservoirs intégrés à la structure, etc. Le Tu-155 a donc anticipé, dès 1988, le constat qui motive aujourd'hui ces refontes architecturales : l'hydrogène liquide ne se «greffe» pas sur un avion classique.

Phase 2 — Le pivot méthane (GNL / CH_4)

Dès janvier 1989, Tupolev oriente l'essentiel du programme vers le méthane liquéfié (GNL). Le Tu-155 effectue au total une centaine de vols d'essai jusqu'au début des années 1990, dont la grande majorité au GNL, avec des démonstrations publiques à Bratislava, Nice (octobre 1989), Hanovre (juillet 1990) et Berlin (juillet 1991). Aucun incident majeur n'a été rapporté sur l'ensemble de cette campagne.

Le méthane présente, par rapport à l'hydrogène, des contraintes nettement moins sévères — sans pour autant être «simple» en soi, le GNL restant un carburant cryogénique à -161 °C nécessitant isolation et gestion du boil-off :

- Température de liquéfaction plus accessible : -161 °C, soit environ 90 °C au-dessus de celle du LH_2 .

- Densité énergétique volumique nettement supérieure à celle de l'hydrogène liquide, permettant des réservoirs plus compacts.
- Profil de sécurité différent : moins diffusif et moins facilement inflammable que l'hydrogène (voir annexe pour le détail des profils de risque respectifs).
- Base industrielle existante : l'expertise GNL était déjà disponible dans l'industrie gazière soviétique, et l'est aujourd'hui dans l'industrie gazière mondiale — à adapter, mais non à créer ex nihilo.
- Combustion plus propre que le kérosène : réduction des NOx, quasi-absence de suies.
- Continuité moteur démontrée : le même emplacement moteur a volé au LH_2 puis au GNL ; le dérivé NK-89 était conçu pour fonctionner au GNL comme au kérosène.

Le point important pour la cellule elle-même : contrairement à l'hydrogène, l'intégration du GNL n'a pas nécessité de repenser la structure de l'avion — la cellule Tu-154 a accepté la modification. Cela ne signifie pas que l'avion restait exploitable commercialement en configuration d'essai (la cabine était occupée par les réservoirs et l'instrumentation), mais que la conversion structurelle est restée dans le domaine du faisable sur une cellule existante, ce qui n'a pas été le cas pour l'hydrogène.

Le coup d'arrêt : la géopolitique, pas la technique

Le programme Tu-155 ne s'est pas arrêté pour des raisons techniques. Il s'interrompt au début des années 1990, dans le contexte de l'effondrement de l'URSS et de l'arrêt des financements publics. Un successeur en version d'exploitation, le Tu-156 (motorisé en NK-89, dérivé du NK-88 capable de fonctionner au GNL comme au kérosène), avait été envisagé mais ne sera jamais construit.

Ce que cela implique pour la filière bio-GNL aviation

Deux précisions techniques sont nécessaires pour la cohérence du dossier Résilience :

1. Du bio-CH_4 au bio-GNL

Le biométhane produit par pyrogazéification, tel qu'injecté dans le réseau gazier, doit faire l'objet d'une épuration supplémentaire (élimination du CO_2, de l'azote et des traces d'eau résiduelles) avant liquéfaction, sous peine de givrage dans les échangeurs cryogéniques. La filière bio-GNL aviation suppose donc une étape de purification additionnelle par rapport au biométhane «réseau».

2. Infrastructure aéroportuaire

Si la base industrielle GNL est mature à l'échelle mondiale, l'avitaillement cryogénique en aéroport reste, comme pour l'hydrogène, une infrastructure à construire — avec l'avantage que les techniques de manipulation du GNL sont déjà maîtrisées par ailleurs (transport maritime, stockage terrestre), ce qui réduit le risque industriel par rapport à une filière hydrogène entièrement nouvelle.

Synthèse

En définitive, le Tu-155 n'a pas testé deux carburants, mais deux niveaux de complexité d'architecture. Le LH_2 impose une rupture d'architecture — refonte complète de la cellule, comme le confirment aujourd'hui les projets hydrogène européens à l'horizon 2035 — tandis que le méthane permet une adaptation d'architecture, sans refonte du fuselage. Pour un long-courrier commercial, les réservoirs passent dans une aile redessinée (voir Segment ④ Long-courrier V8.2).

Le programme n'a pas été interrompu pour des raisons techniques, mais par la chute de l'URSS. L'hydrogène liquide a, lui aussi, volé sur cet appareil — mais c'est le méthane qui a fait l'objet de la validation en vol la plus répétée et la plus aboutie opérationnellement (changement de carburant en vol en quelques secondes, vols jusqu'à 13 000 m, démonstrations publiques internationales). À ce jour, le GNL/méthane demeure ainsi le seul carburant cryogénique alternatif ayant démontré, de façon répétée, sa compatibilité avec une cellule de transport modifiée — ce qui constitue un précédent solide pour la voie bio-GNL.

Annexe — Caractéristiques physiques et sécurité comparée : LH_2 vs GNL

1. Propriétés physiques de base

Propriété	Hydrogène liquide (LH_2)	Méthane liquéfié (GNL/CH_4)	Kérosène (Jet A-1, référence)
Point d'ébullition à pression atmosphérique	-253 °C (20 K)	-161 °C (112 K)	~150-300 °C (plage de distillation)
Densité du liquide	~71 kg/m³	~423 kg/m³	~800 kg/m³
Densité énergétique massique	~120 MJ/kg	~50 MJ/kg	~43 MJ/kg
Densité énergétique volumique (liquide)	~8,5 MJ/L	~21-23 MJ/L	~34-35 MJ/L
Rapport d'expansion liquide → gaz	~1:848	~1:600	—

Ce tableau permet de chiffrer précisément l'écart évoqué dans le corps du texte : à énergie égale, un réservoir de LH_2 doit être environ 4 fois plus volumineux qu'un réservoir de kérosène, contre environ 1,5 à 1,6 fois pour le GNL. C'est cet écart de volume — et non un simple inconfort technique — qui impose la refonte architecturale dans le cas de l'hydrogène.

2. Inflammabilité et explosivité

Avant d'entrer dans le détail, un point doit être posé clairement :

Il n'existe pas de carburant «plus sûr» en absolu entre l'hydrogène et le méthane — chacun présente un profil de risque différent, qui appelle des stratégies de mitigation différentes. Ce qui suit vise à préciser ces profils, pas à désigner un gagnant.

Paramètre	Hydrogène	Méthane
Plage d'inflammabilité dans l'air (% volume)	4 % – 75 %	5,3 % – 15-17 %
Plage de détonabilité (% volume)	13 % – 65 %	6,3 % – 13,7 %
Énergie minimale d'inflammation	~0,02 mJ	~0,26-0,29 mJ
Température d'auto-inflammation	~585 °C	~537 °C
Vitesse de diffusion dans l'air	référence ×1	~4 fois plus lente que H_2

Trois constats découlent de ces chiffres :

L'hydrogène est plus facile à enflammer et sur une plage de concentrations beaucoup plus large.

Une énergie d'inflammation de 0,02 mJ est environ 13 fois inférieure à celle du méthane — une décharge électrostatique anodine peut suffire. La plage d'inflammabilité (4-75 %) couvre presque toutes les concentrations possibles d'un mélange air/hydrogène, contre une fenêtre beaucoup plus étroite pour le méthane (5-15 %). À l'inverse, à volume de fuite égal, l'hydrogène contient nettement moins d'énergie chimique que le méthane ou les vapeurs d'hydrocarbures (rapport de l'ordre de 1 à 3,5 selon l'IFPEN/H2 Mobile) : une explosion d'hydrogène libère donc moins d'énergie totale qu'une explosion de méthane de même volume. Autrement dit, l'hydrogène est plus probable à enflammer mais potentiellement moins sévère en énergie libérée par unité de volume — deux critères qui ne se résument pas à un classement unique.

La diffusivité de l'hydrogène est à double tranchant.

En milieu ouvert, elle constitue un avantage de sécurité réel : un hydrogène qui fuit se dilue très rapidement et descend en quelques minutes sous la limite inférieure d'inflammabilité, alors qu'un nuage de GPL (propane, butane), plus lourd que l'air, stagnerait au sol — le GNL, lui, ne reste bas que tant que sa vapeur est froide (voir ci-dessous). C'est l'argument généralement avancé par la filière hydrogène. Mais en milieu confiné — et un fuselage d'avion en est un — cette même propriété devient un problème : l'hydrogène s'échappe par les moindres interstices (sa petite molécule traverse des joints qui seraient étanches au méthane), et un gaz dont la densité gazeuse est environ 14 fois inférieure à celle de l'air remonte et s'accumule en partie haute de la structure — précisément la zone où se trouvent les faisceaux électriques et l'avionique. Ce mécanisme d'accumulation en partie haute d'un espace confiné est un principe de sécurité générique : c'est lui qui justifie les exigences de ventilation haute et de détection spécifique dans les référentiels de sécurité hydrogène (normes ATEX, recommandations HyResponder), indépendamment de tout contexte d'application particulier.

Le méthane se comporte différemment selon sa température.

À l'état de vapeur froide (juste après évaporation d'une fuite de GNL), le méthane est plus dense que l'air et forme initialement un nuage qui reste près du sol (phénomène bien documenté sur les terminaux GNL ; il cesse lorsque la vapeur se réchauffe au-delà d'environ −110 °C). En se réchauffant, il devient plus léger que l'air et se dilue vers le haut. Cette phase initiale «au sol» est en réalité plus simple à gérer en zone d'avitaillement aéroportuaire (détection au niveau du sol, ventilation latérale) qu'une fuite d'hydrogène qui se dirige immédiatement vers les structures hautes.

3. Implications spécifiques pour une cellule d'avion

Fragilisation par l'hydrogène

À haute pression et à certaines températures, l'hydrogène diffuse dans la structure cristalline de nombreux aciers et alliages, les rendant plus fragiles (hydrogen embrittlement). Cela impose une sélection de matériaux spécifique pour les réservoirs, canalisations et raccords — un poste de coût et de qualification supplémentaire qui ne se pose pas dans les mêmes termes pour le méthane.

Géométrie de fuite en cas d'incident

Dans un fuselage, une fuite d'hydrogène se dirige vers le haut et s'accumule contre la structure supérieure — zone difficile à ventiler efficacement et proche de nombreux équipements électriques. Une fuite de méthane reste initialement basse (vapeur froide plus

dense que l'air), ce qui laisse davantage de temps et d'options pour la détection et l'évacuation par le bas ou par les soutes.

Détection

La flamme d'hydrogène est quasiment invisible à l'œil nu (bleu très pâle), ce qui complique la détection visuelle d'un début d'incendie — un capteur dédié est indispensable. La flamme de méthane est visible, comme celle des hydrocarbures classiques.

4. Synthèse sécurité pour le dossier Résilience

Ce qui distingue concrètement les deux options pour l'aviation n'est donc pas un verdict de sécurité univoque, mais l'accumulation de contraintes :

- le méthane impose une gestion cryogénique (-161 °C) mais avec une chimie de risque proche de celle déjà maîtrisée pour le GNC/GNV terrestre et le transport maritime de GNL ;
- l'hydrogène ajoute, par-dessus la contrainte cryogénique plus sévère (-253 °C) et le besoin de volume 4 fois supérieur, des contraintes de sécurité qualitativement nouvelles pour l'aviation (fragilisation des matériaux, accumulation en partie haute de structure confinée, détection de flamme invisible) qui n'ont pas d'équivalent direct dans l'expérience industrielle existante.

C'est cette accumulation de contraintes nouvelles — volumétrique, matérielle et sécuritaire — qui explique pourquoi les architectures hydrogène à l'étude (Airbus ZEROe et équivalents) nécessitent une refonte complète de la cellule, alors que le retour d'expérience du Tu-155 montre qu'une conversion GNL reste compatible avec un fuselage existant (sur démonstrateur, avec réservoirs en cabine ; en exploitation commerciale, réservoirs dans une aile redessinée).

5. Au-delà de la physique : la complexité certifiable (élément d'interprétation)

Les sections précédentes comparent des propriétés physiques et chimiques mesurables. Un niveau d'analyse supplémentaire, de nature plus interprétative, mérite d'être mentionné car il est souvent décisif dans l'industrie aéronautique : la notion de complexité certifiable.

En aviation commerciale, un système n'est pas retenu uniquement parce qu'il est supérieur sur le plan physique, mais parce qu'il est certifiable, duplicable, maintenable et assurable à l'échelle d'une flotte. Sur ce plan, les écarts mis en évidence plus haut (volume, fragilisation des matériaux, comportement en espace confiné, détection) ne s'additionnent pas de façon linéaire : chaque contrainte nouvelle introduite par l'hydrogène — nouveaux matériaux, nouvelles procédures de maintenance, nouveaux capteurs, nouvelles règles d'espacement — interagit avec les autres et complexifie d'autant le dossier de certification. Le méthane, en s'appuyant sur une cellule existante et sur des principes cryogéniques déjà éprouvés dans d'autres secteurs (GNL maritime, GNV terrestre), s'inscrirait dans une logique de complexité incrémentale plutôt qu'exponentielle.

Avertissement méthodologique : cette lecture reste, à ce stade, une interprétation raisonnée et non un résultat chiffré. Nous n'avons pas identifié de données publiques comparant directement les coûts de certification d'un système propulsif hydrogène et d'un système GNL pour l'aviation civile. Si le dossier Résilience souhaite s'appuyer sur cet argument auprès d'interlocuteurs techniques (cabinets parlementaires, industriels), il est préférable de le présenter comme un axe de réflexion — «on peut raisonnablement anticiper que...» — plutôt que comme un fait établi, en l'absence de sources primaires sur les coûts de certification comparés.

Sources : Wikipédia «Sécurité de l'hydrogène» ; France Hydrogène, Note de décryptage sécurité hydrogène ; INERIS/AFHYPAC, Fiche 7.1 Inflammabilité et explosivité de l'hydrogène ; H2 Mobile/IFPEN, La sécurité des véhicules à hydrogène ; HyResponder, Cours 2 — Propriétés de l'hydrogène relatives à la sécurité.