



**HAL**  
open science

# Matériaux transpirants pour le refroidissement par effusion des parois de chambres de combustion aéronautiques

Cécile Davoine, Daniel Gaffié

► **To cite this version:**

Cécile Davoine, Daniel Gaffié. Matériaux transpirants pour le refroidissement par effusion des parois de chambres de combustion aéronautiques. Entretiens de Toulouse 2020, Oct 2020, Online, France. hal-03111185

**HAL Id: hal-03111185**

**<https://hal.science/hal-03111185>**

Submitted on 15 Jan 2021

**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.

# MATÉRIAUX TRANSPIRANTS POUR LE REFROIDISSEMENT PAR EFFUSION DES PAROIS DE CHAMBRES DE COMBUSTION AÉRONAUTIQUES

Cécile Davoine – Daniel Gaffié

## 1. Contexte - Généralités

Le durcissement continu de la réglementation OACI en matière de réduction de l'impact environnemental de l'Aviation Civile, impose aux motoristes du secteur Aéronautique, la nécessité de concevoir des chambres de combustion à hautes performances, environnementales et de durée de vie. Dans ce contexte, les recherches menées dans le domaine de l'Aérothermique – plus précisément de la caractérisation et de la maîtrise des contraintes thermiques et thermomécaniques qui s'exercent au sein des parties chaudes des chambres de combustion aéronautiques – sont au cœur des préoccupations des industriels concernés. Il s'agit d'une problématique simple dans sa compréhension. Au sein d'une chambre de combustion aéronautique en fonctionnement, les niveaux de température atteints dans le volume du tube à flamme, s'avèrent largement supérieurs aux températures de fusion des matériaux qui le constituent. Il s'ensuit l'impérieuse nécessité de disposer de dispositifs de refroidissement bien dimensionnés préservant les performances de durabilité attendues de turbomachines aéronautiques.

Cette contribution aux Entretiens de Toulouse 2020 est centrée sur l'investigation de techniques innovantes de refroidissement s'appuyant sur un principe d'effusion<sup>1</sup> d'air froid au travers de matériaux poreux, dont la conception profite assez largement des potentialités offertes par la fabrication additive.

## 2. Fonctionnement des foyers aéronautiques conventionnels

La propulsion des avions, militaires et civils, s'appuie essentiellement sur le turboréacteur à double-corps et double-flux. La chambre de combustion en est un constituant essentiel dont le rôle est de convertir l'énergie chimique stockée dans le carburant (kérosène) en énergie thermique utile au fonctionnement de la turbomachine et *in fine* à la propulsion de l'avion.

Comme observé sur la figure ci-dessous, le flux d'air primaire – comprimé et réchauffé lors de la traversée préalable des étages compresseurs contribue à l'alimentation directe du tube à flamme, mais également du circuit de contournement, situé à sa périphérie.

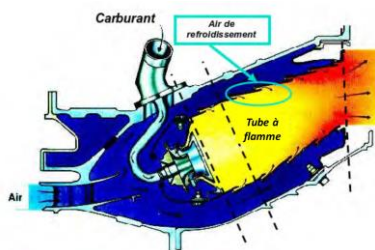


Fig. 1 Fonctionnement d'une chambre de combustion aéronautique.

Les conditions de pression et de température HT-HP imposées en entrée de la chambre de combustion ont un rôle majeur sur le développement et l'avancement du processus de combustion, aérodynamiquement stabilisée en fond de chambre via l'action d'un système d'injection étagé. Il faut noter que la tendance actuelle pour assurer la meilleure efficacité du moteur est à l'augmentation conjointe du taux de dilution (rapport des flux de masse, secondaire et primaire) et du taux de compression. Cela conduit à des niveaux de pression et de richesse dans la chambre de combustion de plus en plus élevés.

Ces conditions HP-HT imposées en entrée de chambre ont un effet catalytique sur l'efficacité de combustion conduisant à installer dans la zone primaire de la chambre de combustion – pour des conditions de mélange air-carburant fixées – des températures élevées, proches des maxima attendus à l'équilibre chimique.

## 3. Dispositifs de refroidissement pour foyers aéronautiques

Dans son principe général, le dispositif de refroidissement est fondé sur un prélèvement en continu d'une fraction de l'air disponible dans le circuit de contournement et sa réintroduction maîtrisée aux parois du tube à flamme pour contribuer au maintien de leur tenue thermique. Les dispositifs étudiés, s'appuyant sur l'effusion d'air froid circulant au sein d'un matériau poreux, ne dérogent pas à ce principe. De fait, leur efficacité de refroidissement peut être comparée à celle des techniques usuelles fondées sur l'utilisation de parois multiperforées.

<sup>1</sup> L'effusion se réfère au passage d'un gaz par un trou sans collisions moléculaires, sous-entendant que le diamètre du trou est inférieur au libre parcours moyen des molécules (autrement dit que le nombre de Knudsen est supérieur à l'unité).

Ainsi, l'écoulement d'air froid – créé à la faveur du différentiel de pression qui s'applique entre le circuit de contournement et l'intérieur de la chambre de combustion – contribue à favoriser d'une part, un échange interne fluide-solide à la traversée du dispositif de refroidissement lui-même, d'autre part, à créer les couches limites, dynamiques et thermiques, protectrices des parois internes exposées aux hautes températures des gaz de combustion. La conjugaison adéquate de ces deux mécanismes définit l'efficacité du dispositif de refroidissement considéré.

### 3.1 Techniques de refroidissement fondées sur la multi perforation

Parmi les dispositifs conventionnels aujourd'hui en vigueur pour assurer le refroidissement des chambres de combustion les concepts fondés sur la multiperforation occupent une place de choix et constituent vis-à-vis de toute autre stratégie de refroidissement utilisatrice de matériaux transpirants, une solution de référence. Elle consiste 1) en l'aspiration de l'air « froid » issu du circuit de contournement via des milliers d'orifices inclinés (angle de 45 à 60° par rapport à la normale à la paroi) de 4 à 5 dixièmes de millimètres de diamètre, 2) en la restitution par soufflage de l'air capté au tube à flamme, au niveau des zones nécessitant refroidissement. Cette technique, bien qu'opérant un refroidissement performant du matériau demeure toutefois perfectible, car bien que répondant aux exigences des conditions d'exploitation, elle présente un abattement des caractéristiques mécaniques qui peut conduire à l'apparition de fissures.

A ce stade, on retiendra que le refroidissement induit par une paroi multiperforée s'effectue selon trois processus ; **1)** par convection côté froid, **2)** par convection forcée à l'intérieur des orifices, **3)** via l'installation d'un film de refroidissement protecteur créé le long de la surface chaude de la paroi. A signaler toutefois quelques effets potentiellement préjudiciables tels que : la propension à produire plus de monoxyde de carbone (CO) et d'hydrocarbures imbrûlés par figeage des réactions chimiques de la combustion au voisinage des parois, l'inhomogénéité du champ de température au sein du matériau multiperforé tendant à favoriser la formation de fissures, la quantité d'air allouée au refroidissement estimée trop importante. De plus, compte tenu de la faible épaisseur des parois (1,5 à 2 mm), l'échange thermique interne au matériau, demeure limité même si la surface d'échange dans les trous peut représenter jusqu'à trois fois la surface de la paroi. En revanche, un aspect thermiquement très intéressant de la technique résulte du fort pouvoir de pénétration des micro-jets issus des trous de multiperforation, qui contribuent à la création d'une couche limite turbulente à haute énergie cinétique qui protège des gaz à haute température produits par la combustion.

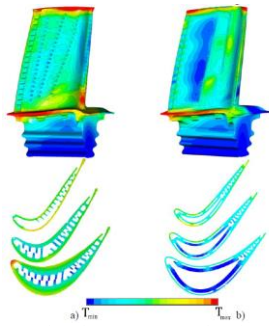
### 3.2 Matériaux pour refroidissement par transpiration

Ces matériaux particuliers doivent être conçus pour assurer un échange thermique optimal entre les milieux fluide et solide. Ils sont élaborés selon différents procédés de fabrication issus essentiellement de la métallurgie des poudres et peuvent, le cas échéant, bénéficier des avantages apportés par la fabrication additive, en termes de fabrication de matériaux architecturés.

Comparativement aux parois multiperforées, l'épaisseur de matériau, de même que la surface spécifique, étant nettement plus élevées, cette technique offre l'avantage d'assurer un refroidissement par convection forcée, autrement plus performant. Du point de vue des inconvénients potentiels de cette nouvelle technique de refroidissement, on retiendra :

- la tenue thermomécanique, dont il faut assurer le maintien des performances voire l'amélioration, comparées à des parois multiperforées ;
- une efficacité de protection potentiellement amoindrie de la couche limite, induisant un risque d'exposition critique de la surface du matériau à des températures trop élevées, celles-ci étant susceptibles de dégrader la capacité de refroidissement.

Conception d'un réseau déterministe de canaux de refroidissement : La fabrication additive offre une liberté de conception jusqu'alors inégalée. Le conformal cooling qui consiste à positionner, à l'aide de procédés de fabrication additive, des canaux de refroidissement au plus près des zones à refroidir, s'est largement développé. Dans le domaine de la propulsion aéronautique, ce procédé de fabrication se révèle très prometteur pour concevoir notamment les circuits internes de refroidissement des aubes de turbines HP (cf. Fig. 2).



**Fig. 2 :** Exemples de géométries d'aubes de turbine à canaux internes optimisés pour le refroidissement [1].

Ainsi, la conception, la fabrication de matériaux métalliques en vue de leur applicabilité aux dispositifs de refroidissement constitue une thématique de recherche de pointe dans le domaine aéronautique. En la matière, l'efficacité *in fine* d'un dispositif de refroidissement résulte de la contribution de différents apports inhérents au choix du matériau (haute température), aux performances des canaux constituant le circuit de refroidissement interne, au plus près des surfaces exposées, à l'ajout de barrière thermique, à l'installation de couches limites, dynamique et thermique, assurant de manière plus externe la protection et le refroidissement des parois chaudes.

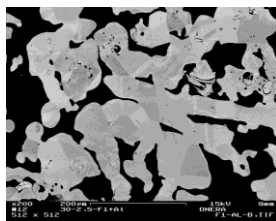
Grâce à l'émergence de technologies 3D innovantes (Electron Beam Melting, metal spray coating, Direct Metal Deposition, Selective Laser Melting, ...), certains verrous technologiques de fabrication qui constituaient un frein à l'application industrielle, sont aujourd'hui levés (ou en passe de l'être). L'élaboration de matériaux à haute performance, intégrant des circuits de refroidissement à la morphologie complexe, hors de portée par les voies de fabrication conventionnelles, est aujourd'hui possible. Toutefois, ces nouvelles techniques de fabrication nécessitent la mise en place d'outils d'aide à la conception.



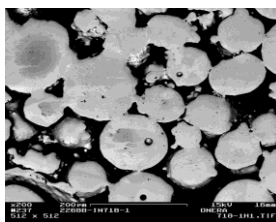
**Fig. 3 :** Géométrie de canaux 3D avec des interconnexions entre les trous de refroidissement.

Ces nouvelles stratégies de fabrication sont employées à l'élaboration de techniques de refroidissement innovantes pour les chambres de combustion aéronautiques, à leur intégration et à leur dimensionnement optimisé dans le but de maximiser l'échange de chaleur par convection forcée à l'intérieur des orifices. Un premier design a été imaginé : il s'agissait de rajouter des interconnexions entre les trous de refroidissement (Fig. 3). Il faut toutefois noter que les capacités de conception des morphologies 3D de réseaux de canaux ne sont pas illimitées. Des contraintes de fabrication additive demeurent, en termes de maîtrise de la taille minimale, de la tortuosité et de la rugosité des canaux élémentaires constitutifs du réseau de refroidissement, de capacité de reproductibilité de ces matériaux à iso-performance pour des coûts de fabrication maîtrisés.

Conception de matériaux poreux aléatoires : La conception de matériaux, dits transpirants, assurant un refroidissement par effusion des parties chaudes de la chambre de combustion est fondée sur le procédé de frittage partiel de poudres métalliques. Elle permet d'obtenir une phase poreuse complètement interconnectée dans la plage de porosité ciblée (20 à 50%) tout en assurant une résistance mécanique relativement bonne. Elle offre de surcroît la possibilité d'utiliser les superalliages constituant les parois actuelles multi-perforées.



Matériau IP



matériau SP

**Fig. 4 :** Morphologies internes des matériaux IP et SP (Images MEB)

A l'ONERA, les travaux se sont concentrés sur les matériaux fabriqués à partir de deux types de poudres métalliques : Les poudres irrégulières produites par atomisation d'eau et les poudres sphériques produites par atomisation de gaz, référencées respectivement IP600 et SP718 dans ce qui suit (conformément à la classification des deux superalliages à base de nickel : Inconel 600 et Inconel 718).

Les échantillons de matériaux poreux IP Inconel® 600 ont été fabriqués par la société française Sintertech sous le nom poral®. L'Inconel® 600 est un alliage nickel-chrome utilisé pour des applications nécessitant une résistance à la corrosion et aux hautes températures.

Les échantillons de matériaux poreux SP Inconel® 718 ont été produits à l'Onera. L'Inconel 718 est un alliage nickel-chrome durcissable par précipitation contenant également des quantités importantes de fer, de niobium et de molybdène ainsi que des quantités moindres d'aluminium et de titane.

### 3.3 Caractérisation expérimentale des matériaux transpirants

La quantification de l'efficacité de refroidissement des matériaux transpirants considérés repose sur un nombre réduit de propriétés thermo-physiques telles que la perméabilité, la conductivité thermique, la dilatation thermique et la densité du matériau poreux, dépendant fortement de leur nature et de la morphologie du réseau interne qui les compose.

Au cours de l'entretien seront abordés les différents essais mis en œuvre visant à assurer cette caractérisation approfondie. En préalable, nous reportons dans le tableau qui suit, pour les deux matériaux précités, les résultats obtenus à l'issue des campagnes d'essai.

**Tableau 1 :** Mesures expérimentales des propriétés clés des matériaux étudiés.

Matériaux poreux	SP718 Inconel 718	IP600 Inconel 600
Forme des grains de poudre	Sphérique	Irrégulière
taille des grains de poudre (µm)	300	150
Porosité	0.35	0.42
Conductivité thermique effective à température ambiante (W/mK)	1.33	2.20
Perméabilité $k$ ( $m^2$ )	$3.3 \cdot 10^{-11}$	$2.2 \cdot 10^{-11}$
Coefficient d'échange volumétrique ( $W \cdot K^{-1} \cdot m^{-3}$ )	$3.3 \cdot 10^{-7}$	$1.8 \cdot 10^{-7}$

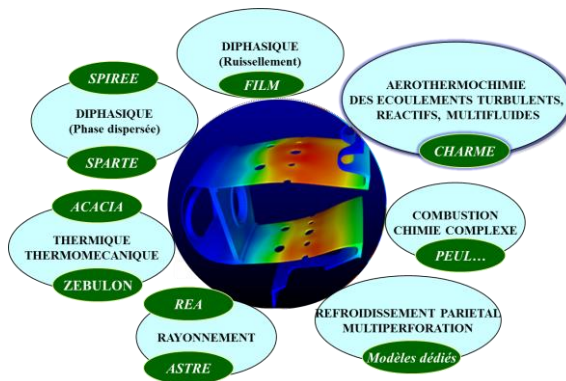
Il convient d'ajouter quelques commentaires au tableau de la détermination expérimentale des propriétés clés :

- ✓ La conductivité thermique effective est dépendante de la température et résulte de la conduction de la partie fluide et de la partie solide (qui est prépondérante).
- ✓ Deux paramètres aérodynamiques importants relativement au régime d'écoulement du fluide de refroidissement observé au sein du matériau poreux : la perméabilité  $k$  et le coefficient de Forchheimer  $\beta$ .
- ✓ Le coefficient de transfert thermique est de première importance, puisqu'il pilote l'échange entre les deux phases en présence au sein du matériau.

## 4. Modélisation macroscopique pour un milieu homogène équivalent

### 4.1 Techniques de refroidissement innovantes et simulation numérique multiphysique

La conception des chambres de combustion à hautes performances environnementales et de durée de vie requiert de plus en plus le recours à des plateformes logicielles multi-physiques aptes à rendre compte des nombreux phénomènes physicochimiques qui interagissent au sein du tube à flamme.



**Fig. 5 :** La plateforme multiphysique CEDRE de l'ONERA

La figure 5 illustre – pour le cas particulier du code de calcul CEDRE développé par l'ONERA – la complexité à laquelle on doit faire face pour simuler numériquement l'écoulement réactif multi-physique qui se développe au sein d'une chambre de combustion aéronautique. A chaque physique particulière est associé un solveur dédié. La simulation numérique doit être capable de rendre compte de l'évolution spatio-temporelle des physiques en présence, interagissant au gré de leurs actions et rétroactions. Les contraintes thermiques et thermomécaniques aux parois de la chambre sont la conséquence directe de flux convectifs et radiatifs qui sévissent dans la chambre de combustion, maîtrisés via les dispositifs de refroidissement.

Les temps de restitution des simulations numériques se trouvent fortement impactés par la nécessité de devoir considérer le caractère multiphysique de ces écoulements réactifs à l'origine de l'introduction de temps caractéristiques très différents (injection diphasique du carburant et ses mécanismes de pulvérisation primaire, secondaire et d'évaporation, chimie complexe via l'introduction de mécanismes réactionnels réduits suffisant pour la description du processus de combustion, turbulence et combustion turbulence, prise en compte des transferts radiatifs).

Ce contexte particulier impose une contrainte forte en termes d'investigation des comportements pariétaux, d'introduction de modèles bifaces dédiés à la prise en compte de dispositifs de refroidissement. De plus – pour des raisons liées à la fois à la maîtrise des temps de calcul et à la validité de la Mécanique des Milieux Continus – la simulation numérique déterministe du réseau de refroidissement d'un matériau transpirant s'avère totalement caduque. Il s'ensuit que le comportement aérodynamique et thermique du milieu poreux considéré est décrit via une approche statistique conduisant à l'obtention d'équations unidimensionnelles.

Ces équations, outre le bilan de masse et de quantité de mouvement, expriment l'échange d'énergie thermique entre les deux phases fluide et solide, constitutives du matériau considéré. La modélisation adoptée traduit ainsi le comportement aérothermique « macroscopique » du milieu poreux, traversé par l'écoulement d'air produisant son refroidissement. Si l'intérêt s'en fait sentir au cours de l'entretien, la démarche théorique mise en œuvre pour l'obtention de ces équations, sera plus précisément explicitée.

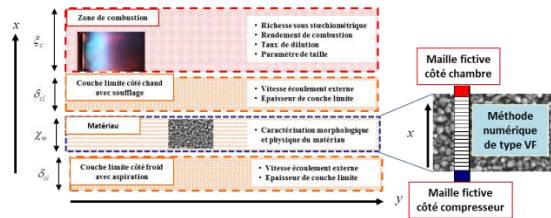


Fig. 6 : Représentation schématique de la modélisation biface classiquement adoptée.

#### 4.2 Focus sur les régimes d'écoulement observés au sein du matériau poreux

A l'échelle macroscopique, le domaine étudié est considéré comme un milieu homogène et continu. Il s'introduit dans les équations unidimensionnelles précitées, un nombre limité de coefficients introduisant simplement l'influence des échelles non résolues « microscopiques » sur le niveau macroscopique que l'on cherche à identifier numériquement. Ces coefficients correspondent aux propriétés dites « effectives », répertoriées dans le tableau 2. Celles-ci dépendent des spécificités du comportement moléculaire de chaque phase : fluide et solide. Lorsque la morphologie du matériau est simple et parfaitement connue, les grandeurs effectives s'évaluent de manière exacte à partir de l'état local, microscopique (taille de grains de poudre ou capillaires). Dans le cas contraire, les valeurs des grandeurs effectives sont issues d'essais de caractérisation.

Tableau 2 : Propriétés effectives et paramètres à définir pour la résolution des équations

$h_v$	Transfert thermique volumique.
$\lambda_f$	Conductivité thermique de l'air.
$\lambda_{s,eff}$	Conductivité thermique effective
$K$	Perméabilité
$\beta$	Coefficient de Forchheimer

$$\lambda_{s,eff} = f(\text{fluide, matériau, architecture})$$

$$h_v = f(\text{fluide, architecture})$$

$$\kappa, \beta = f(\text{architecture})$$

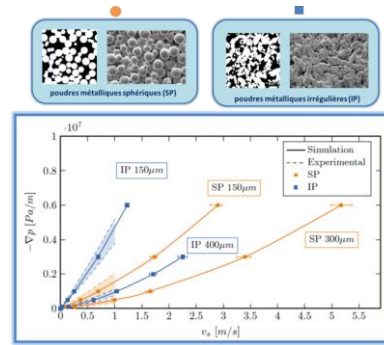


Fig. 7 : Relations entre les pertes de charge et la vitesse de filtration pour les matériaux considérés.

Comme nous l'avons vu précédemment, les architectures internes des matériaux poreux sont très diverses et se caractérisent par l'existence de porosités plus ou moins régulières et interconnectées. Il s'ensuit, à l'échelle macroscopique, l'introduction de la porosité  $\epsilon$  du milieu et de sa surface spécifique  $A_s$  ; deux paramètres clés influençant le calcul des propriétés effectives et des échanges thermiques à l'interface fluide-solide.

En conditions de fonctionnement, le fluide se réchauffe durant sa progression au sein du matériau poreux, du côté froid vers le côté chaud. Une situation qui introduit une modification des propriétés thermodynamiques de l'air, puisque celles-ci sont dépendantes de la température (conductivité thermique  $\lambda_f$ , la viscosité moléculaire  $\mu$ , masse volumique  $\rho$ ). Ainsi, dans ces conditions particulières, la loi de Darcy usuellement considérée pour qualifier le comportement d'un milieu poreux homogène est remise en cause cf. Fig. 8).

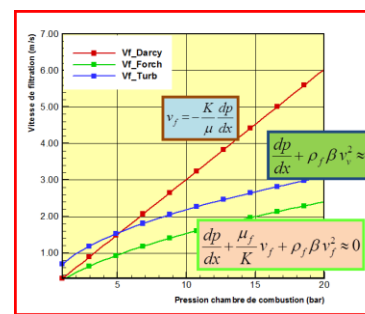


Fig. 8 : Mise en évidence des régimes d'écoulement au sein des matériaux poreux.

Cette évolution observée de l'état thermodynamique produit une augmentation significative de ce que l'on nomme usuellement la vitesse  $v_f$  de filtration<sup>2</sup>, conduisant à la survenue de régimes d'écoulement différents. L'introduction du coefficient de Forchheimer  $\beta$  est un facteur permet de rendre compte du comportement non-linéaire de la loi pression-débit, lorsque la vitesse de filtration est plus élevée.

<sup>2</sup> La vitesse de filtration est une vitesse homogénéisée, qui résulte d'une prise de moyenne spatiale portant sur l'ensemble des vitesses locales (dites interstitielles) obtenues au sein du domaine étudié à un instant donné. Lorsqu'elles sont suffisamment élevées, ces vitesses interstitielles sont génératrices d'écoulements localement turbulents, induisant un comportement non-linéaire de la relation entre le différentiel de pression  $\Delta P$  appliqué et le débit de fluide traversant qui en résulte.

### 4.3 Efficacité de refroidissement d'un matériau transpirant

La capacité d'un matériau transpirant à maintenir la température des parties chaudes d'une chambre de combustion à un niveau acceptable est quantifiée au travers de l'efficacité de refroidissement  $\eta_T$ ; égale à l'unité, quand la température de la phase solide est égale à la température de l'air de refroidissement, nulle lorsque le matériau est à la température des gaz brûlés :

$$\eta_T = \frac{T_s - T_{gc}^*}{T_{gf} - T_{gc}^*}$$

La figure 9 présente les distributions spatiales de  $\eta_T$ , initiale et finale, obtenues numériquement, en fonction de la variable  $x$  de traversée du matériau dans son épaisseur (ceci à iso-morphologie interne du milieu poreux). La distribution dite de départ correspond à l'état initial imposé au démarrage du processus itératif. Ces conditions d'initialisation des états, de part et d'autre du matériau poreux, sont précisées sur la figure. Pour un état externe supposé établi, on observe que la solution évolue au cours du temps, jusqu'à obtention de l'équilibre thermique du milieu.

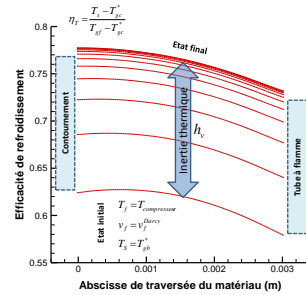


Fig. 9 : Efficacité de refroidissement, initiale et finale, en fonction de  $x$ .

### 4.4 Efficacité de refroidissement d'un matériau transpirant

Les équations unidimensionnelles précédemment introduites sont résolues numériquement par une méthode de volumes finis. Dans le cadre de formulation unidimensionnelle considérée, le maillage se réduit à une simple discrétisation selon l'épaisseur du matériau poreux..

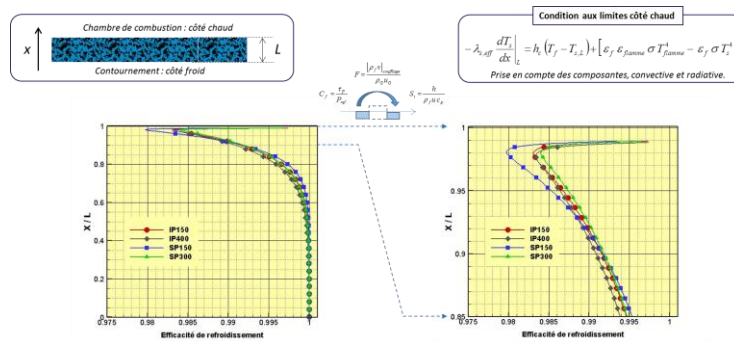


Fig. 10 : Comparaison des efficacités de refroidissement pour les matériaux poreux considérés.

Au refroidissement par convection forcée s'exerçant dans l'épaisseur du matériau, se rajoute, côté chaud, la contribution de la couche limite se développant le long de la paroi du matériau. Celle-ci est plus ou moins apte à protéger la surface du matériau des gaz de combustion. Comme représenté sur la figure, cette capacité de protection induite par la couche limite est dépendante du rapport de soufflage  $F$  : rapport des vitesses massiques d'injection de l'air froid dans la couche limite et hors couche limite au sein du tube à flamme

La caractérisation des échanges thermiques externes, du côté interne de la chambre de combustion est un problème délicat qui nécessite de prendre en compte les différents mécanismes physiques jouant sur la quantité de chaleur échangée à l'interface fluide / solide : convection forcée, conduction et rayonnement des gaz de combustion ( $\text{CO}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}$ ) et des particules de suie. On est ainsi conduit à introduire, sous forme de condition aux limites, les flux de chaleur transmis à la paroi radiatifs et convectif, ce dernier faisant intervenir le coefficient d'échange  $h_c$  ( $\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ ) qui dépend de nombreux paramètres, dont la vitesse de l'écoulement externe, les dimensions de la paroi, les grandeurs thermodynamiques du fluide (chaleur spécifique, conductivité thermique, viscosité dynamique) ; quantités toutes dépendantes de la température. Dans les conditions de pression des turbomoteurs modernes (30 à 40 bar au plein gaz), le rayonnement est la composante principale du flux thermiques en paroi.

### 5. Caractérisation expérimentale des matériaux transpirants

Appuyé par son savoir-faire dans le domaine de l'Aérothermique et de la combustion et ses moyens d'essai spécifiques, l'ONERA tend à développer une méthodologie complète visant à concevoir et fabriquer des matériaux transpirants à haute température, aux caractéristiques parfaitement identifiées sur le plan expérimental. Le comportement de ces nouveaux matériaux est ensuite testé en conditions plus réalistes, en observant une progressivité dans la sévérité de la sollicitation appliquée: 1) des essais non réactifs à basse pression pour des différences de température entre le flux froid et le flux chaud, modérées ; 2) des essais en combustion sous conditions simulées, représentatives des régimes de fonctionnement de chambres de combustion réelles.

En ce qui concerne les essais en combustion, comme illustré sur la figure 11, on reproduit via une injection tourbillonnaire les conditions de développement et de stabilisation du processus de combustion, telles que rencontrées dans la réalité. Le rapport de mélange air-carburant, de même que la répartition du débit carburant entre une injection pilote et une injection principale permet d'étudier le comportement des matériaux refroidis grâce à un écoulement d'air, auxiliaire, pour des conditions de combustion sous ou sur carburée, et pour des régimes de flamme évoluant entre diffusion et prémélange. Les deux paramètres importants, bien connus des motoristes, qu'il s'agit de maîtriser durant les campagnes d'essai sont la richesse globale du mélange  $\phi$  et le facteur de charge  $\sigma$ . La tenue thermique des matériaux est étudiée en maintenant des conditions de combustion établies, sur des durées significatives – qui vont de quelques dizaines de minutes à plusieurs heures – et en jouant sur le débit d'air auxiliaire permettant d'assurer un refroidissement acceptable ; c'est sans dégradation majeure de l'échantillon considéré.

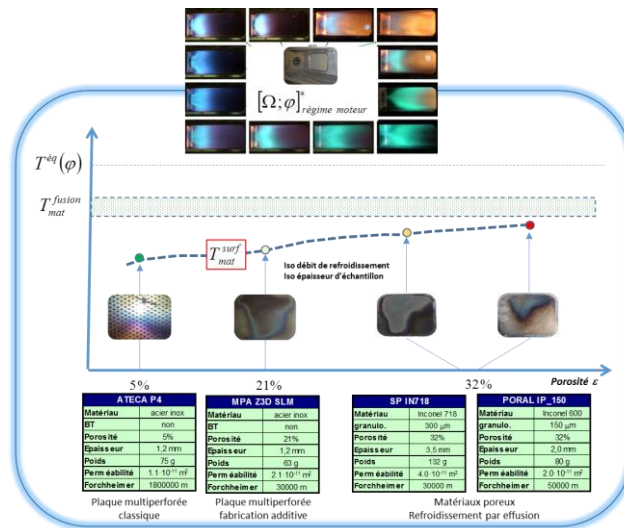


Fig. 11 : Evaluation des matériaux en vue de démonstration de leur applicabilité à la propulsion aéronautique.

## 6. Conclusions et perspectives – Ouverture au débat

Considérant que la conception de turbomachines aéronautiques à émissions réduites ne peut s'envisager en occultant la problématique de durabilité, au cours de la décennie écoulée, l'ONERA a déployé bon nombre de travaux visant à améliorer sa compétence dans le domaine du développement de dispositifs ciblés sur le refroidissement des parties chaudes des chambres de combustion. Parallèlement, les moyens, expérimentaux et numériques, permettant de dimensionner ces dispositifs et de caractériser leurs performances, ont été acquis.

Les projets de Recherche conduits dans un souci de pertinence vis-à-vis du besoin applicatif, ont contribué à améliorer le savoir-faire de l'ONERA dans le domaine de la conception de matériaux à haute performance potentiellement aptes à répondre aux exigences des motoristes du secteur de l'Aviation Civile. Les avancées obtenues, se situent aujourd'hui à des niveaux TRL de l'ordre de 3 à 4. Pour espérer une montée en TRL à 5, voire 6, l'implication conjointe de l'ONERA et des industriels est requise. Les dispositifs de refroidissement potentiellement prometteurs, précédemment décrits, nécessitent d'être consolidés en regard des turbomachines aéronautiques actuelles et à venir, et des sollicitations thermiques qu'elles produisent.

Certaines questions demeurent aujourd'hui en suspens et mériteront d'être abordées dans le cadre de débat.

Quelques exemples : vis-à-vis de ces nouveaux dispositifs de refroidissement, quid des problématiques :

- d'ingestion de particules de sable ou de cendres volcaniques par les moteurs (CMAS : calcia-magnesia-alumina-silica particles) ;
- de reproductibilité de fabrication des nouveaux matériaux ;
- des exigences de certification ;
- de la viabilité économique ;
- de leur devenir dans un secteur aujourd'hui en pleine mutation.