

ATA 29

SYSTÈME HYDRAULIQUE

Anti-sèche complète — Théorie, composants, régulation, sécurité

Fiche de révision synthétique — Mécanique / Avionique — ATA 29 Hydraulic Power

Sommaire

1. Généralités — pourquoi l'hydraulique en aéronautique

2. Principes physiques & formules de base

2.1 Principe de Pascal — 2.2 Pression, force, section — 2.3 Débit, travail, puissance — 2.4 Tableau des unités

3. Les fluides hydrauliques

3.1 Propriétés requises — 3.2 Origine minérale — 3.3 Esters de phosphate — 3.4 Esters de silicate

4. Construction progressive du circuit hydraulique de base

5. Le circuit hydraulique avion

5.1 Problématique fin de course — 5.2 Régulateurs / pompes autorégulatrices

6. Organes de réserve : bâche & accumulateurs

6.1 La bâche hydraulique — 6.2 Pressurisation — 6.3 Les accumulateurs

7. Les générateurs hydrauliques (pompes)

7.1 Classification — 7.2 Pompe à main — 7.3 Pompe à engrenage — 7.4 Pompe à palette — 7.5 Pompes à pistons (fixe/variable) — 7.6 Régulation — 7.7 EDP — 7.8 RAT — 7.9 PTU

8. Les récepteurs

8.1 Vérins (simple/double effet, rotatifs) — 8.2 Verrouillage — 8.3 Moteurs hydrauliques

9. Organes de commande, sécurité et contrôle

9.1 Robinets — 9.2 Sélecteurs/distributeurs — 9.3 Servovalves — 9.4 Limiteurs — 9.5 Diviseurs/limiteurs de débit — 9.6 Valves de séquence/priorité — 9.7 Clapets navette/préférentiel — 9.8 Check valves — 9.9 Prises self — 9.10 Filtres — 9.11 Fusibles — 9.12 Relais de protection

10. Indications & surveillance poste de pilotage

11. La cavitation — causes, précautions, remèdes

12. Fiche mémo finale — l'essentiel en un coup d'œil

1. Généralités — Pourquoi l'hydraulique en aéronautique

NÉCESSITÉ DE L'ÉNERGIE HYDRAULIQUE

L'évolution des avions (taille, transport aérien) rend impossible l'utilisation de câbles, tringles, poulies de renvoi et d'une timonerie complexe : cela alourdit la structure et impose de gros efforts aux pilotes.

Pourquoi l'énergie hydraulique s'est imposée

Avantage	Explication
Faible masse	Masse des équipements hydrauliques faible par rapport à des équipements électriques de puissance équivalente
Transmission rapide	L'énergie hydraulique se transmet quasi instantanément le long des tuyauteries
Repérage des fuites aisé	Une fuite de liquide hydraulique est visible/déTECTABLE facilement, contrairement à une fuite électrique

À RETENIR — L'hydraulique remplace la mécanique (câbles/tringles) pour transmettre de grandes puissances avec un minimum de masse et un effort pilote réduit.

2. Principes physiques & formules de base

2.1 Principe de Pascal

La force appliquée à un fluide est transmise de manière égale à toutes les parties du fluide, dans toutes les directions.

Conséquence pratique : pour une force donnée, la pression engendrée est restituée x2 si la section de réception est deux fois plus grande (principe du multiplicateur d'effort — vérin de garage, presse hydraulique, etc.).

2.2 Pression / Force / Section

$$\text{Pression} = \text{Force} / \text{Section} \rightarrow p = F / S \quad | \quad \text{donc } F = p \times S$$

2.3 Conservation du volume déplacé

$$S1 \times L1 = S2 \times L2 \quad (\text{ex : } 100 \text{ in}^2 \times 20 \text{ in} = 2000 \text{ in}^2 \times 1 \text{ in})$$

Le déplacement d'un volume de liquide reste constant dans un circuit fermé : ce qui est perdu en course est gagné en force (et inversement).

2.4 Débit, travail, puissance

$$\begin{aligned} \text{Débit volumique :} \\ d = V / t = (S \times L) / t = S \times v \end{aligned}$$

$$\text{Travail : } W = F \times L = p \times V$$

$$\text{Puissance : } P = W / t = p \times d$$

2.5 Unités de pression & conversions utiles

Conversion	Valeur
1 inch	= 25,4 mm
1 N	= 0,22 lbf
1 lbf	= 4,45 N
1 bar	= 10 ⁵ Pa = 14,5 PSI
1 h bar	= 10 ⁷ Pa
1 PSI (p.s.i.)	= 0,06897 bar = 6897 Pa
1 livre (pound)	= 0,454 kg
1 CV	= 736 W
1 HP	= 746 W

2.6 Tableau récapitulatif des grandeurs (SI)

Grandeur	Symbole	Unité SI	Équation dimensionnelle
Longueur	L	m	L
Surface	S = L·L	m ²	L ²
Volume	V = L·L·L	m ³	L ³
Temps	t	s	T
Vitesse	v = L/t	m/s	LT ⁻¹
Accélération	γ = v/t	m/s ²	LT ⁻²
Masse	M	kg	M
Force / Poids	F = Mγ / P = Mg	Newton (N)	MLT ⁻²
Pression	p = F/S	Pascal (Pa ou N/m ²)	ML ⁻¹ T ⁻²
Travail	W = F·L	Joule (J)	ML ² T ⁻²
Puissance	P = W/t	Watt (W)	ML ² T ⁻³
Masse volumique	ρ = M/V	kg/m ³	ML ⁻³
Débit volumique	d = V/t	m ³ /s	L ³ T ⁻¹
Débit massique	q = M/t	kg/s	MT ⁻¹
Poids volumique	ω̄ = (M/V)·g	N/m ³	ML ⁻² T ⁻²

Relations diverses : 1 nœud = 0,514 m/s ; 1 m/s = 3,6 km/h ; g = 9,81 m/s² à Paris ; 1 m² = 10⁶ mm² ; 1 m³ = 10⁹ mm³ (1 USG = 3,78 L) ; 1 calorie = 4,18 J ; 1 thermie = 10⁶ calories.

3. Les fluides hydrauliques

3.1 Propriétés requises

- **Compressibilité** : le liquide est considéré comme incompressible.
- **Viscosité** : indice de viscosité élevé pour éviter les frottements et pertes de charge ; faible variation avec la température.
- **Pouvoir lubrifiant** : suffisant pour la lubrification interne des composants.
- **Faible tendance aux dépôts** : le laminage/brassage continu et les variations de pression favorisent la formation de dépôts de gommages.
- **Faible émulsion** : capacité à ne pas produire de mousse.
- **Stabilité chimique** et **faible volatilité**.
- **Point de congélation bas** (tenir l'altitude de croisière) et **point d'ébullition le plus haut possible**.
- **Peu ou pas combustible** : sécurité.

3.2 Les trois familles de fluides

Origine	Minérale (pétrole)	Synthétique — esters de phosphate	Synthétique — esters de silicate
Spécifications	US: MIL-H-5606 · FR: Air 3520 · GB: DTD 585	FR: NSA-307-110 · US: MIL-H-8446 · Boeing: BMS 3-11 type 4	CM080A
Marques	Univis J13, Aéroshell Fluid 4, Hydraunicoil FH4	Skydrol LD4, Hyjet IV, Aerosafe ER	Hydraulic Fluid M2 V
Aspect	Clair, transparent, teinté rouge	Transparent, teinté violet (bleu/mauve)	Limpide, jaune clair
Inflammabilité	Facilement inflammable	Pratiquement ininflammable	Quasiment ininflammable, non toxique
Plage d'utilisation	-59°C à +98°C	-54°C à +135°C (Hyjet IV)	-54°C à +260°C
Toxicité / corrosivité	—	Toxique (peau, muqueuses, yeux) ; très corrosif pour peintures, vernis, plastiques	Se dégrade au contact de l'air
Utilisation typique	Amortisseurs, certains boîtiers mécaniques de transmission	Boeing et Airbus (circuits hydrauliques puissance)	Concorde

⚠ Ces trois catégories de fluides NE SONT PAS MISCIBLES — ne jamais les mélanger.

4. Construction progressive du circuit hydraulique de base

Démarche pédagogique classique : partir d'un circuit minimal et ajouter les éléments un à un pour corriger chaque défaut constaté.

Étape 1 — Générateur / Transmetteur / Récepteur

Mise en place de : un **générateur** (transforme l'énergie mécanique en énergie hydraulique), un **transmetteur** (tuyau, véhicule l'énergie) et un **récepteur** (transforme l'énergie hydraulique en énergie mécanique).

Critique : déplacement du récepteur limité ; pas de maintien de position du récepteur.

Étape 2 — Réservoir

Mise en place d'un **réservoir** permettant un plus grand déplacement de liquide.

Critique : refoulement du liquide dans le réservoir → pas de déplacement du récepteur.

Étape 3 — Clapets anti-retour (aspiration + refoulement)

Permettent le passage du liquide dans un seul sens et évitent les débits inverses.

Critique : les défauts précédents sont corrigés mais le récepteur ne peut plus revenir à sa position initiale.

Étape 4 — Distributeur 3 voies

Assure un déplacement alternatif du récepteur, avec une tuyauterie retour reliant le distributeur au réservoir.

Critique : le récepteur peut revenir à sa position initiale mais pas avec de l'énergie hydraulique.

Étape 5 — Distributeur 4 voies

Permet l'alimentation d'un récepteur double effet (deux tuyauteries).

Avantage : l'énergie hydraulique est utilisée des deux côtés du récepteur (efficacité accrue). Limite : débit de la pompe à main faible et irrégulier.

Étape 6 — Pompe (entraînée) + clapet anti-retour au refoulement

Assure un débit important et régulier ; entraînée par le réacteur, un moteur électrique, etc. Le clapet anti-retour évite un débit inverse lors de l'utilisation de la pompe à main (secours).

Critique : la pompe débite en permanence et risque de détériorer le circuit si la pression monte trop.

Étape 7 — Clapet de surpression

En cas de pression excessive, remet automatiquement au retour le débit de la pompe.

Ce circuit ne semble plus présenter de défauts majeurs — c'est la base du circuit hydraulique complet.

5. Le circuit hydraulique avion

5.1 Problème de fin de course

Lorsque le récepteur est arrivé en fin de course, le travail de la pompe devient gênant : il engendre une perte d'énergie et un échauffement du liquide.

5.2 Deux solutions

1. **Annuler la pression de refoulement** grâce à un régulateur de pression ajouté après la pompe → équipe les circuits à **pompes à cylindrée constante**.
2. **Annuler le débit de refoulement** de la pompe elle-même → concerne les circuits à **pompes à cylindrée variable**.

5.3 Les régulateurs

Rôle : diriger le débit des pompes vers le retour lorsque la pression dans le circuit atteint sa valeur nominale. On peut les considérer comme des **clapets by-pass automatiques**.

La majeure partie des circuits hydrauliques avion de puissance sont équipés de pompes dites « **auto-régulatrices** » ou à **capacité variable**, munies de servo-mécanismes qui font varier le débit de la pompe en fonction de la demande.

5.4 Architecture type (ex. B777, A310/A380)

Circuit organisé autour de : réservoir(s) pressurisé(s) (bâche), générateurs (EDP, pompes électriques ACMP, RAT), filtres, échangeurs de chaleur, collecteurs de pression/retour, distributeurs vers les servitudes (commandes de vol, trains, freins, volets/becs, inverseurs de poussée...).

Légende couleur usuelle des schémas : **rouge = pression**, **vert = retour**, **jaune = alimentation (supply)**, **bleu = air de prélèvement (bleed air)**.

6. Organes de réserve : bête & accumulateurs

Sous cette catégorie sont classés les **réservoirs (bêtes)** et les **accumulateurs** : ils assurent, pour l'un, une réserve de liquide, et pour l'autre, une réserve d'énergie.

6.1 La bête hydraulique

Rôle : fournir la quantité de liquide nécessaire au fonctionnement du circuit. Mais aussi :

- Compenser les pertes de liquide occasionnées par des fuites ;
- Absorber les variations de volume dues au changement de position des équipements, à l'expansion thermique ;
- Assurer une réserve de secours.

Forme généralement cylindrique, en acier inoxydable ou alliage léger. La capacité varie selon l'importance du circuit et le constructeur.

Pressurisation de la bête

L'altitude élevée en croisière impose de pressuriser les réservoirs (par prélèvement d'air moteur) pour garantir une bonne alimentation des pompes. Deux familles de dispositifs :

- **Dispositifs hydro-mécaniques** : un ressort taré positionne un tiroir qui module l'arrivée d'air vers la bête.
- **Dispositifs pneumatiques** (les plus courants aujourd'hui) : détendeur (abaisse la pression vers ~50 psi) + clapets de surpression et de dépression pour protéger la bête.

L'évolution technique regroupe toutes ces fonctions dans un seul équipement : le **régulateur / module de pressurisation** (contenant diaphragme, siège plastique, ressort de position, clapets...).

⚠ **Dépressuriser la bête avant toute intervention sur un circuit hydraulique.**

6.2 Les accumulateurs

Rôle : pallier toute baisse de pression dans le circuit (mise en route de servitudes, etc.) en restituant l'énergie accumulée en fonctionnement normal. Rôle d'**amortisseur** (coup de bélier) à l'arrêt d'une servitude.

Type	Principe
Cylindrique à vessie (bladder)	Une vessie souple sépare gaz (azote) et liquide dans un corps cylindrique
Cylindrique à piston	Un piston libre sépare le gaz du fluide dans un cylindre
Sphérique à vessie	Même principe que la vessie, dans un corps sphérique
Sphérique à diaphragme	Un diaphragme souple sépare gaz et liquide dans une sphère

Fonctionnement (accumulateur à vessie) : précharge gaz N2 (ex. 1000 psi) → charge en fluide → pression système établie (ex. 3000 psi) → décharge lors de la demande.

⚠ **Un circuit comportant un accumulateur est une réserve d'énergie potentiellement dangereuse : dépressuriser le circuit en faisant fonctionner les servitudes avant intervention.**

7. Les générateurs hydrauliques (pompes)

Rôle : transformer l'énergie mécanique reçue (GTR, moteur électrique, moteur hydraulique, vent relatif...) en énergie hydraulique.

7.1 Classification générale

Famille	Caractéristique	Exemples
Pompes non volumétriques	Grand débit, faible pression ; les deux dépendent du régime de rotation	Pompe centrifuge
Pompes volumétriques	Débit dépendant du régime mais pas de la pression ; principalement utilisées en aviation	Pompe à barillet, pompe à main

7.2 La pompe à main

Simple ou double effet. Sur avion de ligne, ce type de pompe n'est plus utilisé que pour effectuer un complément de liquide hydraulique sur un circuit. Existe en version **double effet** (bras à va-et-vient) et en version **rotative**.

7.3 Pompe à cylindrée constante — la pompe à engrenage

De conception simple : le carter contient deux pignons maintenus entre deux flasques ; un pignon est moteur, l'autre mené. Débit précis, continu, sans à-coup. Répond bien aux besoins des circuits de petite/moyenne puissance.

Variantes : **pompe à engrenage simple** (la plus utilisée) et **pompe à engrenage interne**.

7.4 La pompe à palette

Utilisée en aviation légère sur les circuits de dépression (vacuum system). Le rotor crée deux volumes variables V1 et V2 (refoulement/admission, diminution de V1, restitution/augmentation de V1). Les frottements — donc l'usure des palettes — limitent le rendement.

7.5 Les pompes à pistons

Équipements haute performance, en deux catégories :

a) Pompes à capacité (cylindrée) fixe

- **Barillet dans l'axe** : le plateau tournant crée le mouvement des pistons.
- **Barillet désaxé** : les pistons et le barillet tournent ; c'est l'inclinaison du corps de pompe qui crée le mouvement des pistons.

Régulation des pompes à capacité constante

Rôle : mettre au retour l'excès de pression délivré par la pompe. La pression s'établit sur un piston (A) et sur la surface opposée ; au-delà du tarage du ressort, le piston A percute une bille (B) qui met la pression au retour ; le piston recule et la bille reprend son siège quand la pression retombe sous le tarage.

b) Pompes à capacité (cylindrée) variable — les plus utilisées en aviation

En faisant varier l'inclinaison du plateau (swashplate), on fait varier le débit. Lorsque le plateau est à l'horizontale, le débit est nul.

Moteur/pompe à plateau incliné (fixe) : le plateau est fixe, la pression à l'arrière des pistons leur communique un mouvement de translation ; le barillet se met en rotation, entraînant l'arbre.

Moteur/pompe à barillet : les pistons sont reliés au plateau ; l'inclinaison du corps du moteur crée la variation de course des pistons. Barillet, pistons et plateau sont mécaniquement liés et communiquent le couple à l'arbre.

Le plateau se met en position « débit nul » si :

- La demande de débit chute, la pression augmente et ouvre la valve de compensation ;
- Une commande électrique actionne le solénoïde de dépressurisation (EDV) — sélecteur poste sur OFF ou poignée coupe-feu tirée.

7.6 La pompe entraînée moteur (EDP — Engine Driven Pump)

Pompe à pistons à cylindrée variable, entraînée directement par le réacteur (GTR). Composants clés : impeller (pompe de gavage), barillet, pistons, yoke (plateau), compensator valve, blocking valve, case drain, clapet anti-retour, EDV piston.

7.7 La RAM Air Turbine (RAT)

Certains avions sont équipés d'une éolienne (RAT) qui, grâce au vent relatif, fournit une réserve de puissance hydraulique (et électrique pour certaines). Équipée en général d'une pompe moins puissante, elle n'alimente qu'une partie essentielle du circuit (ex. commandes de vol).

7.8 Le Power Transfer Unit (PTU)

La combinaison d'un moteur hydraulique et d'une pompe hydraulique s'appelle un PTU. Il permet de transférer de la puissance hydraulique d'un système (ex. Green) vers un autre (ex. Yellow) sans transfert de fluide entre les deux circuits — utile en cas de panne d'un générateur sur un des systèmes.

8. Les récepteurs

Deux catégories : **les vérins**, qui restituent l'énergie mécanique sous forme d'une force en translation, et **les moteurs**, qui la restituent sous forme d'un couple en rotation.

8.1 Les vérins

Équipements simples, utilisés chaque fois que le mouvement recherché est rectiligne alternatif.

Type	Fonctionnement
Vérin simple effet	Pression hydraulique d'un côté ; retour assuré par un ressort (spring chamber)
Vérin double effet	Pression hydraulique alternée de chaque côté du piston (extend / retract)

Vérin rotatif (rack and pinion)

Transforme un mouvement de translation (piston / crémaillère) en mouvement de rotation (pignon). Selon la configuration, la rotation peut atteindre 720° ou plus. Utilisé par exemple pour l'orientation du train avant.

Dispositifs de verrouillage des vérins

Utile pour maintenir un vérin dans une position déterminée (ex. vérin de verrouillage train bas), par blocage mécanique de la tige ou du piston :

- **Verrouillage radial** : clés (keys) en position verrouillée/déverrouillée pilotées par pression hydraulique.
- **Verrouillage par griffe** : piston verrouilleur + griffe + ressort de verrouillage / ressort de maintien, commuté par la pression.
- **Verrouillage à billes** : billes logées dans une gorge, maintenues par un piston auxiliaire ; la pression déplace le piston auxiliaire pour libérer les billes (déverrouillage).

8.2 Les moteurs hydrauliques

Utilisés lorsque l'énergie mécanique doit être récupérée sous forme d'un couple en rotation nécessitant une grosse puissance. On les trouve sur les servitudes de forte puissance : VBA (volets), VBF (becs), THS (stabilisateur horizontal trimmable), commandes de train, etc.

Globalement du même type que les pompes (plateau incliné fixe ou barillet), et certains équipements sont d'ailleurs réversibles pompe/moteur.

9. Organes de commande, de sécurité et de contrôle

9.1 Les robinets (Shut-Off Valves)

Rôle : fermer l'arrivée de l'hydraulique. Plusieurs technologies :

- **Robinet à guillotine (gate valve)** — globalement le plus utilisé ; lame (blade) entraînée par un moteur électrique via un train d'engrenages, avec levier de manœuvre manuelle de secours.
- **Robinet à boisseau sphérique (ball valve)** — un boisseau sphérique percé, entraîné par un moteur électrique via un arbre d'entraînement, avec indicateur de position.

9.2 Les sélecteurs (distributeurs)

Rôle : distribuer la pression hydraulique d'un côté ou de l'autre d'une servitude, et permettre le contrôle de sa vitesse de déplacement.

Position OFF — pompe au retour via relief valve, cylindre isolé	Position EXTEND — pression vers cyl 2, retour depuis cyl 1	Position RETRACT — pression vers cyl 1, retour depuis cyl 2
--	---	--

Type de centre	Comportement
Open center	Au neutre, la pompe débite librement au retour (servitude isolée, pas de pression bloquée)
Close center	Au neutre, tous les orifices sont fermés (pression maintenue en amont)
Servitude en pression	Les deux chambres du récepteur restent alimentées en pression au neutre
Servitude au retour	Les deux chambres du récepteur sont mises au retour au neutre

9.3 Les servovalves (commande électrique)

Type	Principe	Classement
Électro-hydraulique à clapets	Un côté du tiroir est mis au retour par l'alimentation d'un solénoïde	Tout ou rien
Jet Pipe	Le solénoïde (couple motor) oriente une buse (jet pipe) en fonction de la demande ; l'équilibrage de pression au niveau des ressorts de centrage positionne le tiroir au neutre	Servovalve en pression
Flapper Nozzle System	Le solénoïde oriente un volet (flapper) qui obstrue plus ou moins l'une ou l'autre des deux buses (nozzles) ; l'équilibrage des débits aux nozzles positionne le tiroir au neutre	Servovalve en débit

Structure générale à 2 étages : **étage 1** (armature/flapper à double bobinage, aimants permanents) pilote **l'étage 2** (tiroir/spool valve) qui alimente l'actionneur (chambres A/B).

Régulation par palette

Variante de servovalve pilotant un tiroir via un système à palette, utilisée pour la régulation fine de débit/pression dans certains équipements.

9.4 Les organes de sécurité — limiteurs

Type	Fonction
Limiteur de pression (pressure relief valve)	Bille + ressort taré ; s'ouvre vers le retour au-delà d'une pression de tarage réglable par vis
Limiteur de température (heat exchanger)	Échangeur (serpentin) refroidissant le fluide, ex. par échange avec le carburant en aile

9.5 Diviseurs et limiteurs de débit

- **Diviseur de débit (flow divider)** : divise de façon équilibrée le débit d'entrée entre deux sorties A et B.
- **Limiteur de débit (restrictor)** : orifice calibré (sans réglage) ou pointeau réglable (adjustable needle valve) pour réduire une section de passage.
- **Régulateur de débit à débit constant** : limite un débit tout en le maintenant constant grâce à une compensation de pression (balance de pression + clapet anti-retour) qui maintient un ΔP constant entre entrée et sortie ; réglage via une vis modifiant la section du point d'étranglement.

9.6 Valves de séquence et de priorité

Valve de séquence But : automatiser une séquence hydraulique — alimenter une servitude A seulement lorsqu'une servitude B a atteint une position déterminée (ex. autoriser la rentrée du train quand les portes de train sont ouvertes). Peut être mécanique (à seuil de course, tiroir/plunger) ou à seuil de pression.	Valve de priorité Permet, lors d'une baisse de pression due à une forte demande, de prioriser un circuit essentiel (ex. faire sortir les volets plutôt que de fermer les portes de train).
--	--

9.7 Clapets navette et clapet préférentiel

Clapet navette (shuttle valve) But : permettre l'alimentation d'un circuit hydraulique par deux	Clapet préférentiel Permet d'alimenter automatiquement un circuit avec soit une
---	---

sources différentes (système normal ou système alternate) sans interconnexion directe des deux sources.

source principale, soit une source alternate, en fonction de la pression disponible (ex. sélection automatique des freins alternate si la pression système B est basse).

9.8 Les check valves (clapets anti-retour)

But : autoriser l'écoulement du liquide dans un seul sens.

- **Simple-type in-line check valve (ball type)** : bille + ressort, pas de passage inverse.
- **Orifice-type in-line check valve (ball type)** : identique mais avec un passage calibré (drilled passage) autorisant un très léger débit inverse contrôlé.

9.9 Les prises self

But : éviter l'écoulement du liquide lors de l'ouverture du raccord. Fonctionnent par poppet + piston, chacun rappelé par un ressort, qui se ferment automatiquement à la déconnexion. Utilisées en maintenance (complément huile IDG, bêche hydraulique...) et sur les circuits hydrauliques (branchement pompes moteur, etc.).

9.10 Les épurateurs (filtres)

But : filtrer toutes les impuretés solides véhiculées par le fluide. Primordial pour l'efficacité des équipements hydrauliques (fuites internes) : il faut supprimer les particules abrasives de taille supérieure aux jeux les plus faibles.

Emplacements typiques : circuit de remplissage, refoulement des pompes (pression), retour du corps de pompe (case drain / refroidissement), circuit retour général, retour de certaines servitudes. Par inspections régulières, ces filtres sont les premiers indicateurs de l'usure d'un équipement.

Fonctionnement

Le liquide traverse l'élément filtrant de l'extérieur vers l'intérieur ; les impuretés se déposent en fond de cuve de décantation. La section de passage offerte au fluide est toujours supérieure à la section des tuyauteries (limiter les pertes de charge). Un clapet de surpression permet le by-pass de l'élément avec indicateur de colmatage. Des capteurs (pression, température, by-pass) peuvent fournir une indication au poste de pilotage. Un bouchon magnétique en fond de cuve suit les particules métalliques. Un clapet obturateur évite l'écoulement du fluide lors du démontage.

Types d'éléments filtrants

Type	Caractéristique
Filtre à toile métallique	Efficacité faible, filtration des grosses impuretés
Filtre à disques	Cartouche formée de disques et entretoises concentriques empilés
Filtre à spires jointives	Fil d'alliage inoxydable enroulé autour d'un support
Filtre micronique	Cartouche papier/carton synthétique ondulé, grande surface de filtrage

Gestion du colmatage

Un clapet différentiel aimanté est appliqué sur son siège par la pression aval du filtre. Si le ΔP dépasse la valeur de tarage du ressort, le clapet recule : le témoin de colmatage n'est plus maintenu aimanté et apparaît (bouton indicateur) sur le bloc filtre. Un système bilame empêche le témoin de sortir par température froide (liquide moins fluide, ΔP naturellement plus élevé) — thermal lockout.

9.11 Les fusibles hydrauliques

But : éviter, lors d'une rupture de tuyauterie, la perte totale du circuit. Fonctionnement : un piston à ressort équilibré par le débit normal ; en cas de rupture aval, la chute de pression/débit excessif déplace le piston qui obture les orifices de passage — le débit est stoppé.

9.12 Les relais de protection

But : protéger un élément fragile contre les brusques variations de pression. Ils sont réarmables soit par débit de fuite, soit par griffe (système de réarmement mécanique).

10. Indications & surveillance poste de pilotage

Le circuit hydraulique est surveillé sur plusieurs paramètres :

- Pression système (par circuit : L / C / R ou Green / Yellow / Blue selon avionneur) ;
- Niveau et température de la bache (réservoir) ;
- Pression de pressurisation de la bache ;
- État des pompes (EDP, pompes électriques, RAT) : pression, température, sélection ON/OFF/AUTO, fonctionnement RUN ;
- Position des robinets coupe-feu / shut-off valves (OPEN/CLOSED) ;
- Position des valves d'isolement (reserve isolation, nose gear isolation...).

Une indication ou une alarme (visuelle et/ou sonore) est générée selon les cas — pages synoptiques ECAM/EICAS sur avions modernes, ou instruments dédiés/voyants sur cockpits plus anciens (ex. B747 « old school »).

11. La cavitation — causes, précautions, remèdes

On appelle **cavitation** (du latin *cavus*, « trou ») la naissance et l'oscillation radiale de bulles de gaz ou de vapeur dans un liquide soumis à une dépression.

La dépression peut être liée à un écoulement de liquide à forte vitesse (effet Venturi) ou au voisinage d'une pale dans une pompe. Cela se traduit par un sillage de bulles et l'apparition d'une couche de vapeur accrochée à une pale — avec, à terme, une érosion caractéristique des surfaces métalliques (plateaux de distribution, pistons...).

11.1 Précautions

- Pompe immergée ou mise en charge par le liquide ;
- Bâche pressurisée ;
- Pompe de gavage avant la pompe haute pression ;
- Quantité de liquide suffisante ;
- Éviter l'encrassement de la crépine d'aspiration ;
- Viscosité du liquide adaptée au type de circuit, avec indice de viscosité élevé (faible variation) ;
- Diamètre des tuyauteries et raccords en rapport avec le débit ;
- Tuyauterie d'aspiration la plus courte et droite possible, de grosse section (supérieure à l'orifice d'aspiration de la pompe) ;
- Lors d'un remplacement de pompe, toujours la remplir de liquide et la purger.

11.2 Remèdes

- Installer une pompe ayant un débit supérieur ;
- Installer un régulateur ou un limiteur de débit et le régler jusqu'à disparition de la cavitation (la vitesse du vérin devient compatible avec le débit de la pompe) ;
- Installer un clapet de remplissage du vérin, qui s'ouvrira pendant la phase d'approche à vitesse maxi.

12. Fiche mémo finale — l'essentiel en un coup d'œil

Formules clés

$$p = F/S \quad | \quad F = p \times S \quad | \quad S1L1 = S2L2 \quad | \quad d = V/t = S \times v \quad | \quad W = F \times L = p \times V \quad | \quad P = W/t = p \times d$$

Chaîne fonctionnelle du circuit

Réservoir → **Générateur** (pompe : EDP / électrique / RAT) → **Régulation** (pompe cylindrée variable ou régulateur externe) → **Filtration** → **Distribution** (sélecteurs/servovalves) → **Récepteurs** (vérins/moteurs) → **Retour** (filtré) → Réservoir.

Sécurités indispensables à retenir

Fonction	Composant
Limiter la pression	Pressure relief valve / clapet de surpression
Éviter le retour de fluide	Check valve (clapet anti-retour)
Éviter la perte totale du circuit sur rupture	Fusible hydraulique
Protéger un composant fragile	Relais de protection
Filtrer les impuretés	Épurateur / filtre (avec indicateur de colmatage)
Basculer sur une source de secours	Clapet navette / clapet préférentiel
Prioriser une servitude essentielle	Valve de priorité
Réserve d'énergie instantanée	Accumulateur

Points de vigilance sécurité

⚠ **Toujours dépressuriser la bâche ET faire fonctionner les servitudes (pour vidanger un accumulateur) avant toute intervention sur un circuit hydraulique.**

Trois familles de fluides — à ne jamais mélanger

Minéral	Ester de phosphate	Ester de silicate
Rouge, inflammable, -59 à +98°C	Violet, ininflammable, -54 à +135°C, toxique/corrosif (Boeing/Airbus)	Jaune, ininflammable, -54 à +260°C (Concorde)

1. Rôle de l'accumulateur

Pallier une baisse de pression (mise en route d'une servitude) en restituant l'énergie stockée, + amortisseur de coup de bélier à l'arrêt d'une servitude. 4 types : cylindrique à vessie, cylindrique à piston, sphérique à vessie, sphérique à diaphragme. Exemple typique : pré-charge azote (N2) à 1000 PSI, pression système à 3000 PSI.

2. De quoi est fait le liquide hydraulique (3 origines)

- **Minéral** (pétrole) : MIL-H-5606 / Air 3520 / DTD 585 — **rouge**, clair, inflammable, -59°C à +98°C, utilisé amortisseurs/boîtiers mécaniques
- **Synthèse esters de phosphate** : NSA-307-110 / MIL-H-8446 / BMS 3-11 type 4 (Skydrol LD4, Hyjet IV) — **violet/mauve**, quasi ininflammable, -54°C à +135°C, toxique peau/yeux, corrosif peintures/plastiques, utilisé Boeing/Airbus
- **Synthèse esters de silicate** : CMO80A — **jaune clair**, non toxique, quasi ininflammable, -54°C à +260°C, utilisé Concorde

⚠ **Les 3 ne sont pas miscibles entre elles.**

3. Couleurs/modèles → vu au point 2, retiens bien : rouge=minéral, violet=phosphate, jaune=silicate.

4. Origine/entraînement des pompes

Les générateurs (pompes) sont entraînés par le GTR (réacteur), un moteur électrique, ou un moteur hydraulique. Transforment l'énergie mécanique en énergie hydraulique.

5. Valeurs de pression typiques

Circuit normal avion ≈ **3000 PSI** (souvent cité dans les exemples : accumulateur, EDP...). Retiens aussi 1 bar = 14,5 PSI.

6. Photo à légender — éléments d'un circuit hydraulique

Réviser bien les noms : réservoir/bâche, pompe (EDP/ACMP/ADP), filtre, clapet anti-retour, accumulateur, régulateur/limiteur de pression, sélecteur/distributeur, servovalve, robinet (shut-off), récepteur (vérin/moteur), RAT, échangeur de chaleur.

7. Ce qu'on fait avant d'intervenir + le secours

- **Toujours dépressuriser la bâche ET l'accumulateur** avant intervention (faire fonctionner les servitudes pour vider l'énergie résiduelle)
- **Secours** : pompe à main (complément liquide), RAT (éolienne, vent relatif, alimente les commandes de vol), PTU (transfert de puissance entre 2 circuits sans transfert de liquide)

8. Pourquoi l'hydraulique (avantages vs câbles/tringles)

Faible masse par rapport à l'électrique à puissance égale, transmission rapide de l'énergie, repérage des fuites facile.

9. Ordre chronologique de construction du circuit de base

Générateur+transmetteur+récepteur → + réservoir → + clapets anti-retour (aspiration+refoulement) → + distributeur 3 voies → + distributeur 4 voies (double effet) → + pompe entraînée avec clapet anti-retour → + clapet de surpression.

10. Sécurité/protection

Limiteur de pression, limiteur de température (échangeur), fusible hydraulique (coupe si rupture tuyauterie), relais de protection, valve de séquence/priorité, clapet navette/préférentiel, filtres.

11. Les récepteurs — types

2 catégories : **vérins** (translation) simple effet / double effet / rack-and-pinion (rotation, train avant) ; **moteurs hydrauliques** (rotation, couple, grosse puissance : VBA/VBF/THS).

12. Caractéristiques du fluide hydraulique

Viscosité (indice élevé), pouvoir lubrifiant, faible tendance aux dépôts, faible émulsion, stabilité chimique, faible volatilité, point congélation bas, point ébullition haut, peu/pas combustible.

13. Génération hydraulique

= les pompes. Non volumétrique (centrifuge, grand débit/faible pression) vs volumétrique (débit dépend régime pas pression — engrenage, palette, pistons à cylindrée fixe ou variable).

14. La toute première formule du cours

Principe de Pascal : $P = F/S$, donc $F = P \times S$.