

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique**

**Université Saad Dahleb Blida  
Faculté des sciences et des ingénieurs  
Département aéronautique**

**Pour obtenir un diplôme d'étude universitaire appliquée en aéronautique**

**Option : avionique**

**Thème : étude descriptive du réseau AFDX dans l'airbus A380**



**Réalisé par : TLIDJANE ALI**

**Dirige par : Mr Ben Wared**

**Promo 2007-2008**

# REMERCIEMENT

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé dans la réalisation de ce travail, et plus particulièrement mon promoteur Monsieur BEN OUARED pour son aide précieuse et les critiques.

Merci à Madame DOUDOU pour son aide non qualifiable

# DEDICACE

Je dédie ce noble travail à :

- Mes parents, puisse ce travail constituer une légère compensation pour tous les nobles sacrifices que vous vous êtes imposés pour assurer mon bien être et mon éducation qu'il soit l'expression de ma profonde gratitude et ma grande considération. Pour les plus dévoués les parents « que dieu vous garde »
- Tous mes proches et voisins
- Mes amis : Abdou, Hicham, Brahim, Hatem, Hacen, Asma, Assia, Farid, Zaki, Fouzi, Djohni, Rachid, MMM, Youcef et Amine et tous les hommes de la chambre 6A1...etc

## Introduction

Dans le monde des communications classiques, l'utilisation de « réseaux en couches » a permis de rendre les applications indépendantes des systèmes de communication qu'elles utilisent. C'est ce qu'on appelle l'abstraction des moyens de communication.

Cependant les besoins de l'aéronautique sont dictés par des contraintes particulièrement sévères de fiabilité et de redondance. De ce fait les systèmes de communication des avions utilisent des liens de communication et des protocoles spécifiques, adaptés à leurs exigences particulières.

Dans la pratique, l'avionique utilise principalement deux catégories de communications numériques embarquées :

- Les communications de contrôle de processus, qui sont associées à des systèmes d'échantillonnage de valeurs analogiques (vitesse, altitude, orientation...), et qui ne requièrent généralement aucune réponse suite à la transmission d'information (pas d'acquiescement des transmissions).
- Les communications supportant les systèmes d'information embarqués, qui sont basées sur des échanges d'information complexes et structurées (cartes, météo, plans de vol...) nécessitant la mise en place d'un véritable dialogue (acquiescements de réception des informations...). La bande passante nécessaire pour ces échanges est donc plus importante que pour les communications simples.

Le but de mon projet est de faire une étude descriptive du réseau AFDX dans l'avion A380

Pour cela, ce travail sera partagé en trois chapitres :

Le premier chapitre est une généralité sur l'avion A380 de l'AIRBUS.

Le deuxième chapitre est une étude des réseaux terrestres.

Le dernier c'est l'étude du réseau AFDX

**CHAPITRE I :**  
**PRESENTATION GENERALE DE**  
**L'A380**

# I- Présentation générale de l'A380

## I-1) Introduction

Le projet A380 a débuté en 1991 lorsqu'une étude de marché a révélé qu'il y aurait une grosse demande en gros porteur au début du XXI<sup>ème</sup> siècle. C'est donc de cette demande qu'est né l'idée de l'A380, un avion innovant tant par sa taille que par la technologie qu'il contient. Il existe aujourd'hui 2 types d'A380 : l'A380-800 et l'A380-800F.

L'A380-800 : Il représente le plus gros avion de ligne existant. Il peut transporter en moyenne 555 passagers mais peut atteindre les 800 pour des versions différentes de l'avion. Les premières livraisons de ce modèle auront lieu au second semestre 2006.



**Fig -1- : L'A380-800**

L'A380-800F : C'est la version fret de l'A380. Il peut transporter jusqu'à 150 tonnes. Cette version sera livrée à partir du second semestre 2008.



**Fig-2- L'A380-800F**

Comme tout autre nouveau programme, l'A380 offre une possibilité de développement assez importante. On peut donc s'attendre à la sortie d'autres modèles selon la demande du marché.

**a) L'origine du nom A380 :**

Le projet qui est à l'origine de l'A380 de Airbus portait le nom de A3XX. Le choix du 80 peut s'expliquer par 3 aspects : un aspect technique, un aspect commerciale et un aspect général.

**Aspect technique :** L'A380 possède les mêmes caractéristiques au niveau de la structure que l'A340. En revanche, l'A340 ne possède qu'un seul étage alors que pour l'A380, c'est le double.

Donc  $4 \times 2 = 8$ .

**Aspect commercial :** Airbus souhaitera s'implanter en chine ce qui n'est pas une tache facile. Ils font donc tout pour que la chine achète des avions Airbus. Ils ont donc choisit d'appeler l'avion A380 car le chiffre 8 est le chiffre porte bonheur en chine.

**Aspect général :** La version long courrier de l'A380 peut transporter jusqu'à 800 personnes environ.

## b) Les mesures :

L'A380 est le plus gros avion de ligne existant. Il a détrôné le leader du marché depuis une vingtaine d'année : Boeing. Ses dimensions ont été délimitées par la norme de construction des aéroports. En effets, les aéroports internationaux ne peuvent accueillir un avion de plus de 80 X 80m. C'est donc pour cela que Airbus a créé un avion de 79,80 m de large sur 73 m de long. Il mesure 24,10 m de hauteur pour une masse maximale de 562 tonnes répartit sur 20 roues. Le modèle de transport de passager peut transporter jusqu'à 840 personnes et emporter près de 310 000L de kérosène.



**Fig-3- Les mesures de l'A380**



## 2) Présentation générale

### a) Les moteurs

L'A380 est propulsé par 4 turboréacteurs.

Un turboréacteur est un moteur qui produit une poussée par la détente de gaz chaud et à haute pression dans sa tuyère d'éjection. Le carburant (kérosène le plus souvent) brûlant dans une chambre de combustion et l'air comprimé du compresseur produisent les gaz nécessaires.

L'air comprimé provient du compresseur qui aspire l'air extérieur par une entrée d'air. Les gaz sortants de la chambre vont alors actionner une turbine.

La proportion d'air contournant le moteur est variable selon les moteurs. Elle est d'autant plus élevée que le moteur est destiné à voler à des vitesses faibles. Cette proportion est exprimée par le taux de dilution, égal au rapport du flux total (chaud + froid) massique sur le flux chaud massique.

Les turbines fonctionnent grâce au débit des gaz de combustion.

Une partie de l'énergie qui découle de ces gaz entraîne le compresseur d'air qui nourrit le système de combustion. Ce dernier augmente la température, la vitesse et le volume des gaz. Ceux-ci arrivent grâce à un étage d'aubes directrices fixes à un étage d'aubes tournantes (la turbine).

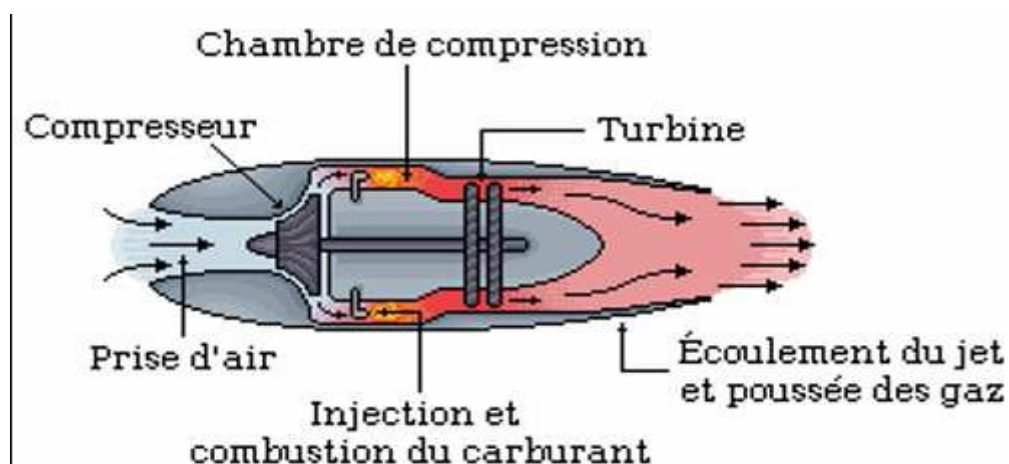


Fig-4- Le turboréacteur de l'A380

## **b) Les trains d'atterrissages**

Le train d'atterrissage de l'Airbus A380 est composé de 22 roues. Ce nombre important permet de mieux répartir le poids de l'avion sur le tarmac. La charge supportée par chaque roue est inférieure à celle supportée sur les autres avions long courrier.

Le train principal est en titane pour un tiers. Il est dirigé par des commandes hydrauliques sous une pression de 5000 psi (345 bars). Cet ensemble a permis d'économiser 1,2 tonne supplémentaire.

L'aile et le réacteur sont reliés par les mâts réacteurs. Ils permettent d'alimenter en carburant les circuits hydrauliques et électriques.



**Fig-5- Les trains d'atterrissages**

## **c) Une volonté de protection de l'environnement**

Airbus s'est aperçut que le marché actuel était très soucieux de l'environnement.

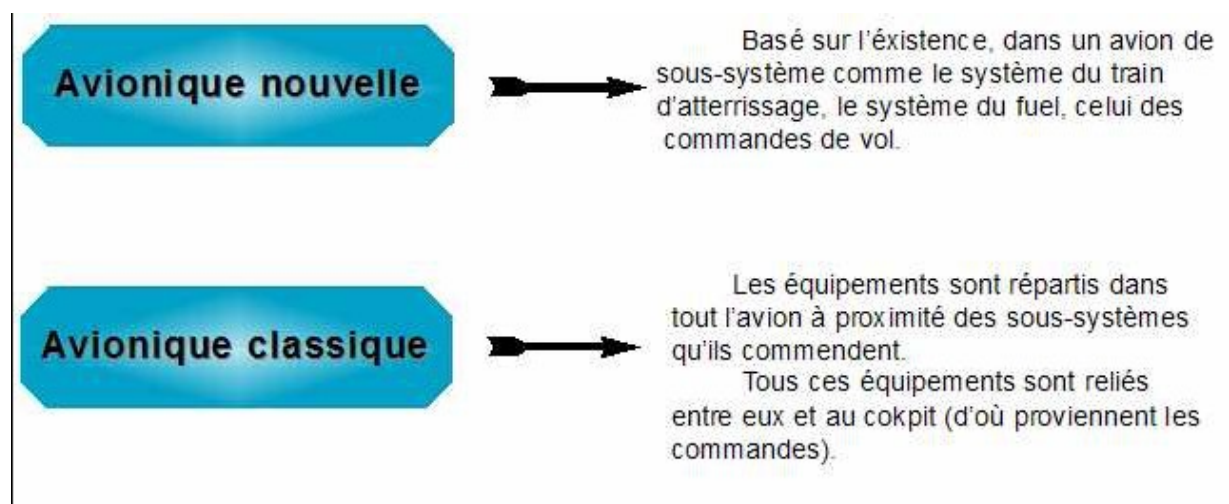
C'est donc pour satisfaire celui-ci qu'Airbus a choisi de créer un avion qui pollue le moins possible. Airbus souhaite dès à présent travailler dans cette optique de protection. Cet aspect est devenu primordial pour l'entreprise.

L'A380 a donc comme particularité d'être plus écologique que les autres. Cet particularité se traduit par :

- Un choix entre deux moteurs, tous les deux très peu bruyant comparé aux turboréacteur des Boeing long courrier.
- Une consommation très basse de kérosène : 2.9L par personne pour 100km. Cette valeur représente la consommation d'une voiture diesel de petite taille. Il consomme 12% de moins par siège que le 747 de Boeing.
- Utilisation beaucoup plus importante de matériel composite en particulier pour le fuselage.

### 3- L'innovation technologique :

Avant de vous expliquer d'un bloc les termes très spécifiques au monde des systèmes embarqués, nous allons tout d'abord parler de l'avionique classique et de l'avionique nouvelle.



**Fig-6- L'avionique classique et nouvelle**

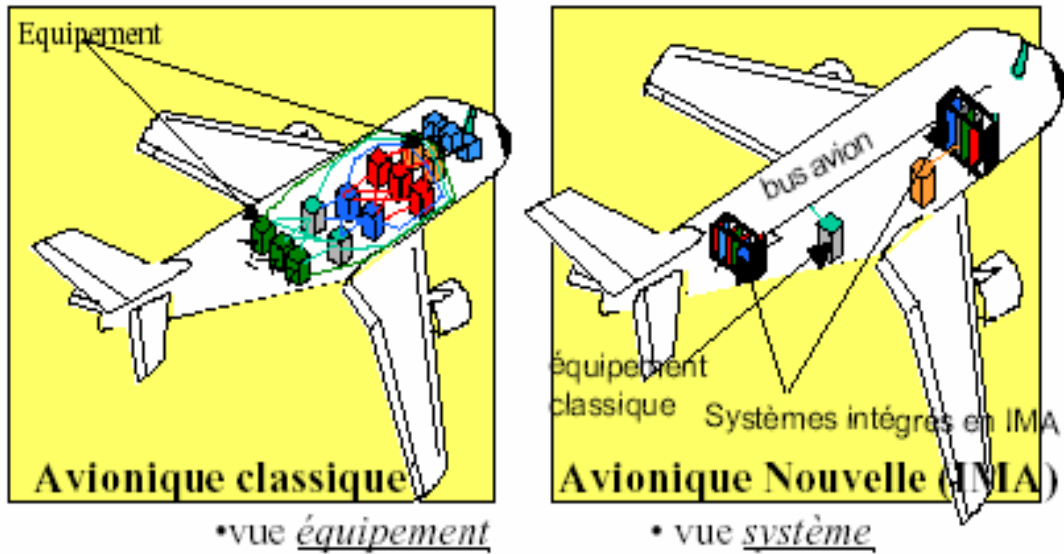
| Avionique Classique   | Avionique Nouvelle   |
|---|--|
| <p><b><u>Point Négatif:</u></b></p> <p>Le poids du câblage est très élevé et les coûts des équipements reviennent élever (environ 40% du coût d'un avion)</p> | <p><b><u>Point Positif:</u></b></p> <p>Partage des ressources de calcul et de communication.</p> |

**Tableau comparatif entre l'avionique classique et nouvelle**

L'avionique nouvelle a un but simple : réduire les ressources matérielles, de limiter les types de cartes électroniques des systèmes avioniques et de les rassembler dans différents endroits répartis dans l'avion afin aussi de réduire le poids du câblage.

L'illustration, qui va suivre va, vous permettre de mieux comprendre nos explications précédentes.

Ce schéma met en évidence les deux types d'avionique et leurs constructions.



**Fig-7- les équipements et les systèmes avioniques dans l'avion**

**Observation de deux tendances pour les protocoles :**

- Les systèmes de maintenance, la transposition des normes de protocoles réseaux utilisés en informatique générale.
- L'utilisation des normes spécifiques à l'avionique pour les systèmes critiques comme les commandes de vol.

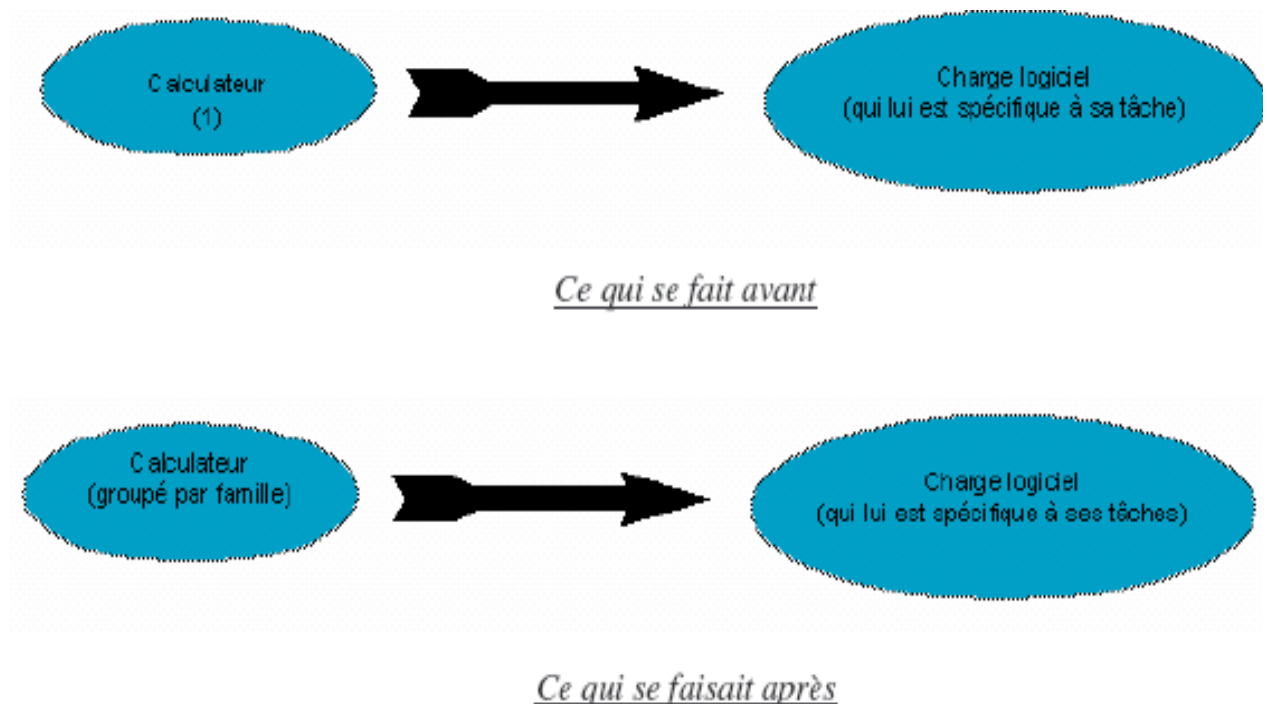
De plus, l'avionique nouvelle qui regroupe les équipements dans des endroits répartis dans l'avion permet d'utiliser localement des bus dits de fond de panier en remplacement de bus de transmission à distance.

## I- Cockpit :

Ce que nous allons développer dans cette partie sera les points situés ci-dessous :

- Réseau Ethernet
- AFDX
- Hydraulique à 5000 psi
- EBHA \_ Notion de commande de cerveau c'est-à-dire permet de bouger les différentes surfaces appelées vérin.

Avant de définir et expliquer, les mots ci-dessus nous allons par des schémas explicatifs ce qui se faisait avant et puis après dans le monde du cockpit :



**Fig-8-** schéma explicatif de ce qui se faisait avant et après dans

## **le monde de cockpit.**

### **1- L'AFDX :**

**1-a) Avionics Full Duplex (AFDX) :** est un réseau Ethernet redondant et fiabilisé, développé et standardisé par les industriels européens de l'avionique pour équiper l'Airbus A380. Il s'agit d'un système destiné à servir de support aux communications internes à l'avion, et non aux communications avec l'extérieur. Les communications internes sont essentiellement les données échangées entre les divers composants de l'avionique.

### **1-b) Avant l'AFDX : état des lieux**

Dans le monde des communications classiques, l'utilisation de « réseaux en couches » a permis de rendre les applications indépendantes des systèmes de communication qu'elles utilisent. C'est ce qu'on appelle l'abstraction des moyens de communication.

Cependant les besoins de l'aéronautique sont dictés par des contraintes particulièrement sévères de fiabilité et de redondance. De ce fait les systèmes de communication des avions utilisent des liens de communication et des protocoles spécifiques, adaptés à leurs exigences particulières.

Dans la pratique, l'avionique utilise principalement deux catégories de communications numériques embarquées :

- Les communications de contrôle de processus, qui sont associées à des systèmes d'échantillonnage de valeurs analogiques (vitesse, altitude, orientation...), et qui ne requièrent généralement aucune réponse suite à la transmission d'information (pas d'acquiescement des transmissions).
- Les communications supportant les systèmes d'information embarqués, qui sont basées sur des échanges d'information complexes et structurées (cartes, météo, plans de vol...) nécessitant la mise en place d'un véritable dialogue (acquiescements de réception des informations...). La bande passante nécessaire pour ces échanges est donc plus importante que pour les communications simples.

## **1-c) Conception de l'AFDX**

### **1-c-1) Les besoins**

L'évolution du marché aéronautique conduit à réduire les coûts, à utiliser des notions de modularité, de réutilisation et de partage des ressources, comme savent le faire les systèmes d'exploitation modernes.

L'objectif de l'AFDX est donc de répondre à ces changements, en prenant en compte des objectifs contradictoires :

- la fiabilité des échanges de données sur le modèle client-serveur ;
- la transmission de données avec de fortes [contraintes temporelles](#) / déterministes ;
- et la réduction des coûts par l'utilisation de composants commerciaux « [sur étagère](#) »
- mais avec des contraintes de certification.

### **1-c-2) Choix technologiques**



Lorsqu'en 1999 il a fallu faire les premiers choix pour définir le nouveau standard, les deux technologies concurrentes pour engendrer l'AFDX étaient, d'une part la combinaison Ethernet - TCP/IP venue du monde de l'informatique, et d'autre part la technologie ATM du monde des télécommunications. Quand le principe de la commutation (utilisé par ATM) est arrivé sur Ethernet, cela en a fait un standard performant et mature, soutenu par un marché bien plus vaste que celui des télécommunications.

### **1-c-3) Norme**

C'est donc l'Ethernet commutée (en mode full-duplex) associé à des modifications spécifiques permettant de prendre en compte les contraintes temps réel et de certification du monde aéronautique qui a été sélectionnée. D'où le nom AFDX : **Avionics Full Duplex** switched Ethernet. AFDX est normalisé par la partie 7 de la norme ARINC 664, norme qui prévoit par ailleurs les besoins ultérieurs, tels que la confidentialité ou la compatibilité avec le protocole IPv6.

### **1-d) Description technique**

L'AFDX est ainsi basé sur des standards ouverts et répond aux objectifs d'un système de communication modulaire pour l'avionique. Il fournit des moyens de partage des ressources, de ségrégation des flux ainsi que le déterminisme et la disponibilité requise pour les certifications aéronautiques. La plupart des fonctions spécifiques d'AFDX sont du niveau liaison de données.

#### **1-d-1) Réseau commuté et redondant**

L'AFDX est basé sur le principe d'un réseau commuté, c'est-à-dire que les équipements terminaux chargés de l'émission ou de la réception des

données s'organisent autour des commutateurs chargés du transport de ces données.

Afin de répondre au besoin de disponibilité du réseau, un réseau AFDX est physiquement redondant : chaque équipement terminal émet les messages sur deux canaux différents vers des ensembles indépendants de commutateurs assurant tous deux la même transmission. Cela permet de réduire les échecs de transmissions, et les problèmes liés à des pannes matérielles. Cette redondance permet également le "dispatch" (départ) de l'avion lorsqu'un voire plusieurs commutateurs sont en panne.

### **1-d-2) Séparation des flux, contraintes temps réel et déterminisme**

La séparation robuste des flux de données s'appuie sur la réservation de bande passante au niveau d'un canal de communication nommé VL (*virtual link* ou lien virtuel). Ces canaux sont associés à un émetteur et les données y sont transmises sur Ethernet en mode diffusion (*multicast*). Les commutateurs permettent la ségrégation des flux par un mécanisme de listes de contrôle d'accès (ACL) filtrant le trafic en fonction des adresses (Ethernet ou MAC), de manière similaire aux pare-feux IP.

Pour garantir le respect des contraintes temps réel de transmission de données, les VL AFDX sont associés à des spécifications de bande passante (ou « contrats »). Ces contrats fixent la taille maximale des trames transmises et le temps minimum entre chaque trame. Ces deux paramètres permettent alors d'évaluer la bande passante maximale d'un VL donné. Le contrat est donc pris en charge par les commutateurs qui gèrent ces VL.

Déterminisme et temps de transmissions sont garantis par le contrat de bande passante associé à la commutation qui évite les collisions et les réémissions.

En résumé, la notion de VL autorise le calcul des latences de transmission maximales, ce qui permet d'effectuer la certification aéronautique du système. Dans la pratique, le réseau Ethernet est donc nécessairement sous-exploité pour permettre la mise en place de ces garanties.

### **1-e) L'AFDX dans l'Airbus A380**

Pour les équipements AFDX déployés dans l'A380, Airbus a imposé de fortes contraintes temporelles :

- *150 micro-secondes* maximum de temps de traversée des couches de communication (UDP, IP, gestion de bande passante, gestion de la redondance et réseau Ethernet)
- *150 micro-secondes* maximum pour la réception d'un trafic continu
- *100 micro-secondes* maximum pour le transfert de trames, le contrôle de l'utilisation de la bande passante et la gestion des diffusions au niveau des commutateurs.

Pour répondre à ces demandes, Airbus a choisi deux fournisseurs : Diehl Aerospace (équipements terminaux) et Rockwell Collins (commutateurs et équipements terminaux).

### **Premier bilan**

L'utilisation de standards ouverts tel qu'Ethernet a permis de réduire les coûts de développement dans certains domaines. Notamment dans le

domaine de l'instrumentation de laboratoire, puisque des outils standards peuvent être utilisés sans nécessiter de développements spécifiques. De même, au niveau de la conception et du développement il est possible de s'appuyer sur des données et une expertise pré-existante.

Toutefois, ces bénéfices sont limités par la nécessité de disposer, dans le domaine aéronautique, de composants réalisés selon un processus de développement certifié. Or les composants du commerce (composants sur étagère) ne peuvent pas souvent répondre à ce critère, et les équipements doivent donc toujours être réalisés spécifiquement pour le marché aéronautique.

Par ailleurs, ce premier réseau AFDX a posé de gros problèmes techniques de mise au point et de déploiement.

### **Perspectives**

L'AFDX propose une nouvelle approche de la conception avionique, plus standardisée et modulaire, en particulier par l'adoption (partielle) de technologies du monde « ouvert ». Son déploiement dans l'avenir semble conforté par son utilisation par Airbus sur son nouvel avion A380 et dans le futur avion militaire A400M, mais plus encore par l'assentiment de Boeing pour ce nouveau standard. Ce protocole est également susceptible d'être utilisé par l'industrie spatiale, à l'image de la NASA qui l'a étudié au début de l'année 2007 pour son nouveau véhicule d'exploration habité.

## **2- Hydraulique à 5000 psi :**

L'A380 a relevé avec succès de nombreux défis ambitieux pour diminuer le poids de l'avion, optimiser les performances et la sécurité du vol, tout en respectant davantage l'environnement.

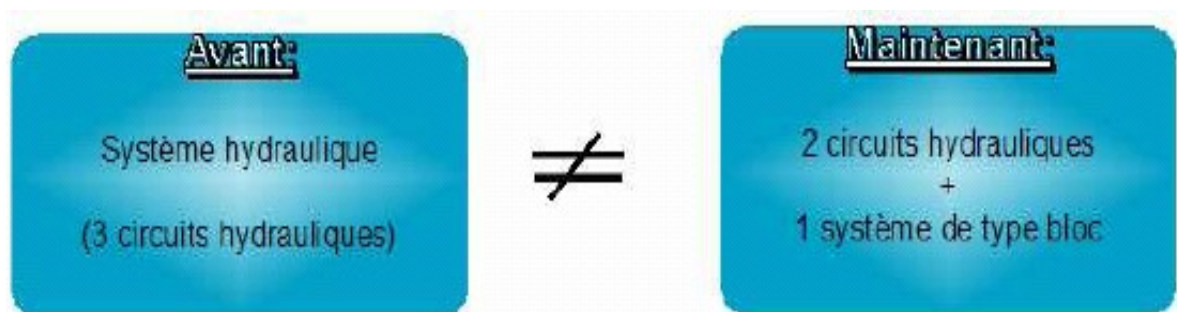
Cette réussite implique la mise en oeuvre de toute une gamme de nouvelles technologies relatives aux matériaux, processus, systèmes et réacteurs.

En compléments de nombreuses innovations dans l'adoption de nouveaux matériaux et de leurs mises en oeuvre plusieurs autres points retiennent l'attention.

- Pour gagner en masse, cet avion fonctionne avec une pression hydraulique de 5000 psi contre 3000 psi pour les autres appareils comparables (toute la tuyauterie et les composants hydrauliques deviennent ainsi plus petits et légers pour assurer la même fonction).

- Des nouvelles solutions basées sur des systèmes hydrauliques et électriques décentralisés sont mises en oeuvre.

Ainsi la génération d'énergie hydraulique et électrique localisée au plus près des dispositifs à actionner a permis de répondre aux dimensions hors normes de l'appareils.



**Fig-9- la différence de système hydraulique avant et maintenant**

Un système de type BLOC possède leur propre système de tube hydraulique. Le système de type BLOC produise leur propre système hydraulique.

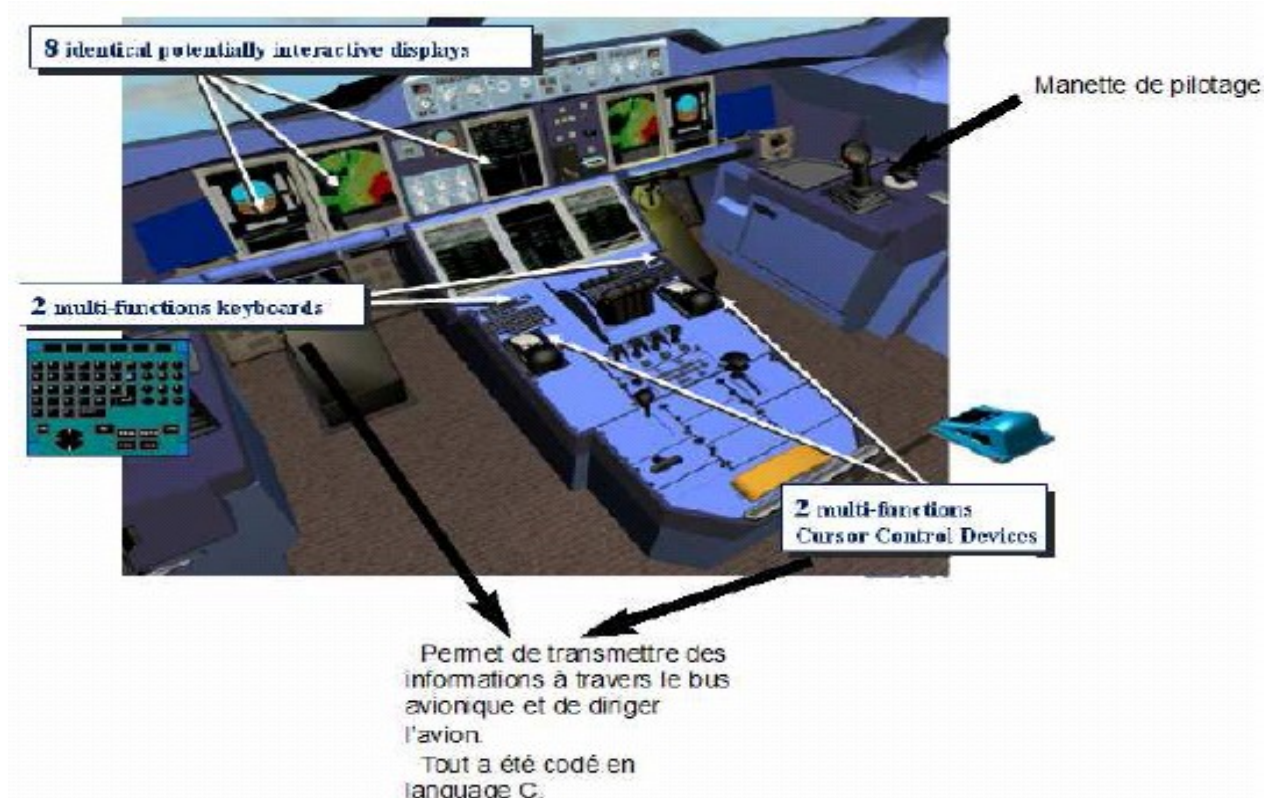
*Nous pouvons faire une analogie avec le watercooling concernant les ordinateurs.*

Ce nouveau système est plus sur et permet la multiplication de la diversification pour les vérins.

### **3- EBHA :**

EBHA est de la classe des servocommandes électro-hydraulique de la même classe que le EHA.

EBHA permet de bouger les différentes surfaces appelées vérin. Voici a quoi va ressemblé un cockpit avec tout les systèmes embarquées citées ci-dessus.



**Fig-10- les systèmes embarqués dans le cockpit**

#### **4- Rapport de vol :**

Sur l'A380, les ingénieurs ont installé une nouvelle technologie concernant le rapport de vol : PFR.

Comme tout est informatisé, si le pilote veut modifier un paramètre de vol, le système la note avec l'heure, etc.

Il n'a plus qu'à sortir le rapport et la vérification des informations se font par les différents techniciens de la compagnie.

#### **5- Documentation de maintenance :**

Si un problème persiste durant le vol et ne contenant que des messages d'erreurs, alors le pilote peut se diriger vers l'ordinateur situé derrière lui.

Par la suite sortir une demande de documentation et régler, si possible, le problème d'erreur.



**Fig-11- L'ordinateur de documentation**

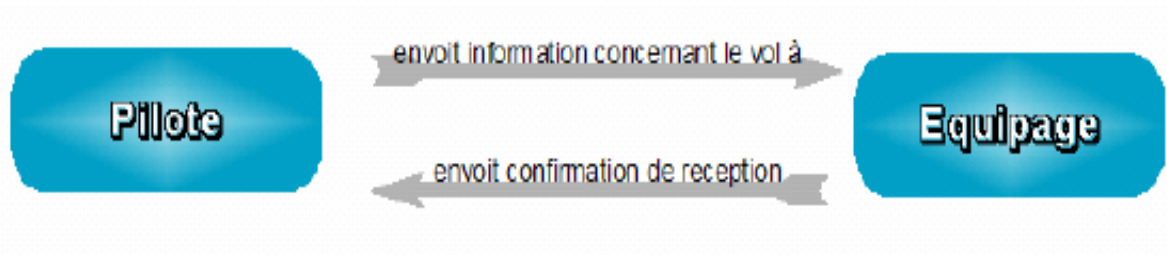
## **II) Cabine :**

### **•ENHS :**

Tout simplement, ENHS est un système d'information qui déploie un type de système d'information de service client tout nouveau, c'est-à-dire il permet à l'équipage de se tenir à courant des différentes informations concernant le vol.

Nous avons donc la relation suivante :





« Schéma du système ENHS »

Fig-12- schéma du système ENHS

### 3) Communication :

- **Communication vol-sol :**

Ce qui a posé problème aux différents ingénieurs fut le problème de communication entre le pilote et la tour de contrôle, donc en veut voir la figure suivante :

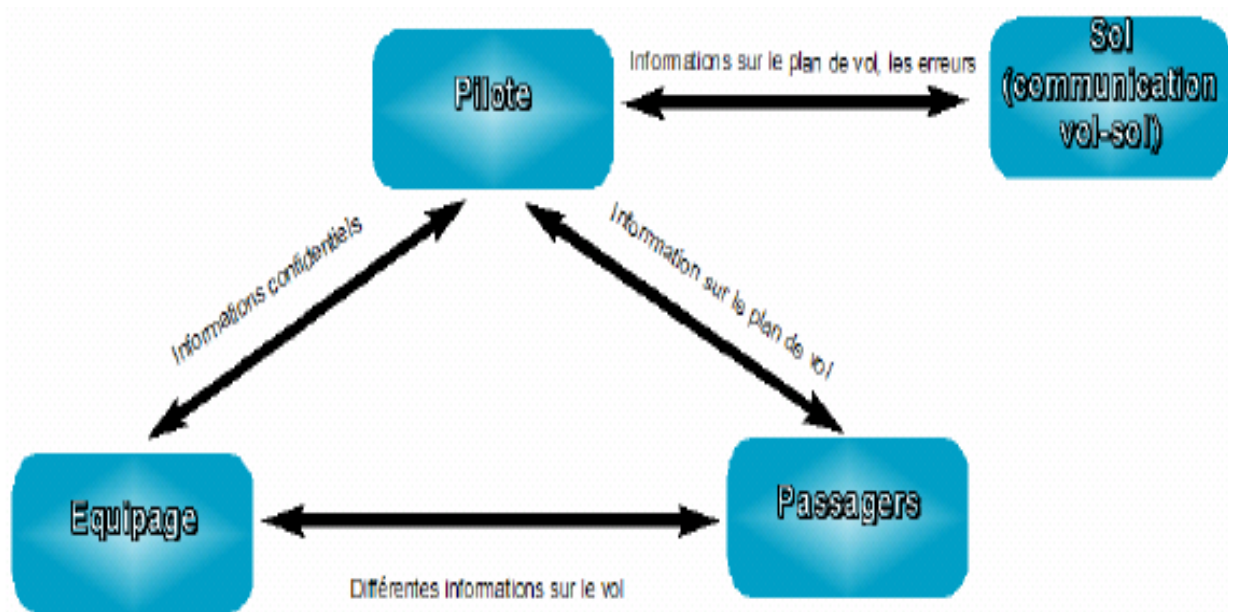


Fig-13- schéma bloc de la communication vol-sol

Les compagnies ayant acheté cet avion ont d'abord subi, sur les aéroports concernés, une série de test pour savoir si l'A380 pourrait décollé et atterrir sur leur piste.

#### **4) Technologie visuelle :**

L'A380 contient une nouvelle technologie que l'on peut critiqué ou pas mais notre but est tout simplement de vous dire en quoi cette technologie consiste.

L'A380 possède des caméras qui utiliser la fibre optique pour la transmission d'image.

Cependant rien d'autre n'est en fibre optique, c'est une grande avancé dans le monde de l'avionique car dans les différents modèles d'avion auparavant tout était en fil.

## **CHAPITRE II :**

### **LES RESEAUX**

## **Introduction :**

Un réseau d'ordinateurs (network) est ensemble d'ordinateurs (et équipements terminaux), géographiquement dispersés, reliés entre eux par un ou plusieurs liens afin permettre les échanges d'informations. Les ordinateurs d'un même réseau sont généralement compatible entre eux, appartenant au même constructeur, en parle dans ce cas de réseau homogène, et s'il y a disparités dans le matériel on dit que c'est un réseau hétérogène.

Un réseau a pour but d'offrir un certain nombre de services à ces utilisateurs, basés sur l'échange d'informations (accès à distance)

- Le partage de fichiers, d'application.

- La communication entre personnes (grâce au courrier électronique, la discussion en direct, ...).
- La communication entre processus (entre des machines industrielles).
- La garantie de l'unicité de l'information (bases de données).
- Le jeu à plusieurs, ...

## **1- Les différents types de réseaux :**

On distingue différents types de réseaux (privés) selon leur taille (en terme de nombre de machine), leur vitesse de transfert des données ainsi que leur étendue. Les réseaux privés sont des réseaux appartenant à une même organisation. On fait généralement trois catégories de réseaux :

- LAN (local area network).
- MAN (metropolitan area network).
- WAN (wide area network).

### **1-a) Les LAN :**

Il s'agit d'un ensemble d'ordinateurs appartenant à une même organisation et reliés entre eux par un réseau dans une petite aire géographique. Un réseau local est donc un réseau sous sa forme la plus simple. La vitesse de transfert de donnée d'un réseau local peut s'échelonner entre 10Mbps (pour un réseau ethernet par exemple) et 100Mbps. Les nœuds du réseau local ne dépassent pas quelques kilomètres. Les réseaux locaux peuvent fonctionner selon deux modes :

- dans un contexte "égal à égal", dans lequel il n'y a pas d'ordinateur central et chaque ordinateur a un rôle similaire.
- Dans un environnement "client/serveur", dans lequel un ordinateur central fournit des services réseau aux utilisateurs.

La taille d'un réseau local peut atteindre jusqu'à 100 voire 1000 utilisateurs, à condition que ces utilisateurs, soient situés à un même emplacement.

### **1-b) Les MAN**

Il peut arriver que l'on veuille relier deux réseaux locaux (LAN) sans que la vitesse de transfert ne soit affectée. Pour relier des LAN géographiquement éloignés il est possible d'utiliser un réseau métropolitain. Ces réseaux utilisent des lignes téléphoniques spécialisées (ou bien des équipements spéciaux) dont le taux de transfert est équivalent à celui d'un LAN, sur de grandes distances. Un MAN permet ainsi à deux LAN distants de communiquer comme si ils faisaient partie d'un même réseau local. Toutefois, les lignes qu'utilise le MAN sont totalement différentes de celle d'un LAN, car elles permettent de transmettre des données sur de très grandes distances, c'est la raison pour laquelle le coût d'un MAN est considérablement supérieur à celui d'un LAN.

### **1-c) Les WAN :**

Lorsque les distances deviennent trop importantes pour arriver à relier des réseaux locaux à leur vitesse de transfert, on est obligé d'utiliser un WAN.

## **2- Présentation d'Internet :**

### **Internet**

Aux débuts de l'informatique des ordinateurs ont été mis au point, dès qu'ils furent aptes à fonctionner seuls, des personnes eurent l'idée de les relier entre eux afin qu'ils puissent échanger des données, c'est le concept de réseau. Il a donc fallu mettre au point des liaisons physiques entre les ordinateurs pour que l'information puisse circuler, mais aussi un langage de communication pour qu'il puisse y avoir un réel échange, on a décidé de

nommer ce langage : protocole. Sur Internet, de nombreux protocoles sont utilisés, ils font partie d'une suite de protocole qui s'appelle TCP/IP est basé sur le repérage de chaque ordinateur par une adresse appelée adresse IP qui permet d'acheminer les données à la bonne adresse. Puis on a associé à ces adresses des noms de domaine pour permettre de s'en souvenir plus facilement. Des réseaux hétérogènes se sont développés dans le monde ; et pour relier ces réseaux entre eux, les protocoles ont donc évolué pour permettre la communication de tous ces réseaux (web) formant le réseau le plus vaste, que l'on appelle Internet. Sur Internet il existe différents protocoles qui permettent de faire différentes choses :

- IRC : discuter en direct.
- http : regarder des pages web
- ftp : transférer des fichiers
- et bien d'autres choses.

On assigne d'entre eux un numéro (le port) qui est transmis lors de la communication (la transmission est effectuée par petits paquets d'informations). Ainsi on sait à quel programme correspond chaque petit paquet :

- les paquets http arrivent sur le port 80 et sont transmis au navigateur Internet à partir duquel la page a été appelée.
- Les paquets IRC arrivent sur le port 6667 (ou un autre situé généralement autour de 7000) et sont transmis à un programme tel que mIRC.

### **3- Les protocoles de communication :**

Un protocole est une méthode standard qui permet la communication entre deux machines. Certains protocoles seront par exemple spécialisés dans l'échange de fichiers (le FTP), d'autre pourra servir à gérer simplement l'état de la transmission et des erreurs...

Sur Internet, les protocoles utilisés font partie d'une suite de protocoles, c'est-à-dire un ensemble de protocoles reliés entre-deux. Cette suite de protocole s'appelle TCP/IP.

Elle contient, entre autre, les protocoles suivants : HTTP, FTP, ARP, ICMP, TCP, IP, UDP, NNTP, Tel net.

#### **4- Les adresses IP :**

Une des choses les plus intéressantes du protocole TCP/IP est d'avoir attribué un numéro fixe, comme un numéro de téléphone, à chaque ordinateur connecté sur Internet; ce numéro est appelé l'*adresse IP*. Dans le cadre du standard actuel - IPV4 -, les adresses sont codées sur 32 bits. Ainsi, tout ordinateur sur Internet, par exemple le vôtre lorsque vous vous connectez par l'entremise de votre provider, se voit attribuer une adresse de type a. b. c. d (où a, b, c, d sont des nombres compris entre 0 et 255), par exemple 202.15.170.1. Dès ce moment, vous êtes le seul au monde à posséder ce numéro, et vous y êtes en principe directement atteignable.

Un rapide calcul vous montre qu'il y a, en théorie, un maximum de  $256^4 = 4'294'967'296$  adresses possibles, ou, en d'autres termes, d'ordinateurs directement connectables, ce qui est plus que suffisant même à l'échelle mondiale (du moins à l'heure actuelle !). En fait, il y a *beaucoup* moins d'adresses que ce nombre impressionnant, car de nombreux numéros IP ne sont pas autorisés ou sont utilisés à des fins "techniques".

Pour l'ordinateur, cette adresse IP est codée en binaire (4 x 8 bits = 32 bits). Par exemple,

|                 |                 |                 |                 |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| <b>202</b>      | <b>15</b>       | <b>170</b>      | <b>1</b>        |
| <b>11001010</b> | <b>00001111</b> | <b>10101010</b> | <b>00000001</b> |

Il est clair que pour nous les humains, il est plus facile de retenir 202.15.170.1 que 11001010000011111010101000000001 !

|                 |                 |                 |                 |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| <b>255</b>      | <b>255</b>      | <b>150</b>      | <b>0</b>        |
| <b>11111111</b> | <b>11111111</b> | <b>10010100</b> | <b>00000000</b> |

### **5- Le protocole IP**

Le Protocole Internet ou **IP (Internet Protocol)** est la partie la plus fondamentale d'Internet. Si vous voulez envoyer des données sur Internet, vous devez les "emballer" dans un *paquet IP*. Je parlerai plus loin de ces paquets IP. Il faut savoir pour l'instant que ces derniers ne doivent pas être trop gros; la plupart du temps, ils ne peuvent pas contenir toute l'information qu'on voudrait envoyer sur Internet, et cette dernière doit par conséquent être fractionnée en de nombreux paquets IP.

Les paquets IP, outre l'information, sont constitués d'un en-tête contenant l'adresse IP de l'expéditeur (votre ordinateur) et celle du destinataire (l'ordinateur que vous voulez atteindre), ainsi qu'un nombre de contrôle déterminé par l'information emballée dans le paquet : ce nombre de contrôle, communément appelé *en-tête de total de contrôle*, permet au destinataire de savoir si le paquet IP a été "abîmé" pendant son transport.

### **6- URL :**

Un URL (Uniform Resource Locator) est un format de nomination universel pour désigner une ressource sur Internet. Il s'agit d'une chaîne de caractères ASCII imprimable qui se décompose en quatre parties :



- **Le nom du protocole** : c'est-à-dire en quelque sorte le langage utilisé pour communiquer sur le réseau. Le protocole plus largement utilisé est le protocole http (hyper text transfer protocol), le protocole permettant d'échanger des pages Web au format HTML. De nombreux autres protocoles sont toutefois possibles.
- **Le nom de serveur** : il s'agit d'un nom de domaine de l'ordinateur hébergeant la ressource demandée. Notez qu'il est toutefois possible d'utiliser l'adresse IP de celui-ci, mais l'URL devient tout de suite beaucoup moins lisible...
- **Le numéro de port** : il s'agit d'un numéro associé à un service permettant au serveur de savoir quel type de ressource est demandée. Le port associé par défaut au protocole est le port numéro 80. Ainsi, lorsque le service web du serveur est associé au numéro de port est facultatif.
- **Le chemin d'accès à la ressource** : cette dernière partie permet au serveur de connaître l'emplacement auquel la ressource est située, c'est-à-dire de manière générale l'emplacement (répertoire) et le nom du fichier demandé.

Les protocoles pouvant être utilisés par l'intermédiaire d'un URL sont les suivants :

- http.
- ftp.
- telnet.
- mailto.
- wais.
- Gopher.

## **7- Le codage d'un URL :**

Etant donné que l'URL est un moyen d'envoyer des informations à travers Internet (pour envoyer des données à un script CGI par exemple), il est nécessaire de pouvoir envoyer des caractères spéciaux, or les URL ne peuvent pas contenir de caractères spéciaux. De plus, certains caractères sont réservés car ils ont une signification (le slash permet de spécifier un sous-répertoire, les caractères & et ? servent à l'envoi de données par formulaires...). En fin, les URL peuvent être inclus dans un document html, ce qui rend difficile l'insertion de caractères tels que < ou > dans l'URL. C'est pourquoi un codage est nécessaire ! Le codage consiste à remplacer les caractères spéciaux par le caractère % (devant lui aussi un caractère spécial) suivi du code ASCII du caractère à coder. Voici la liste des caractères nécessitant un codage particulier.

## **8- La suite de protocoles TCP/IP :**

TCP/IP est une suite de protocoles (utilisé sur Internet). Il signifie Transmission Control protocol/ Internet Protocol (la notion TCP/IP se prononce "T-C-P-I-P", elle provient des noms des deux protocoles majeurs de la suite de protocoles, c'est-à-dire les protocoles TCP et IP). Il représente la façon de laquelle les ordinateurs communiquent sur Internet. Pour cela il se base sur l'adressage IP, c'est-à-dire le fait de fournir une adresse IP à chaque machine du réseau afin de pouvoir acheminer des paquets de données. Etant donné que la suite de protocoles TCP/IP a été créée à l'origine dans un but militaire, elle doit répondre à un certain nombre de caractères parmi lesquels :

- fractionnement des messages en paquets.

- Utilisation d'un système d'adresses.
- Acheminement des données sur le réseau (routage).
- Contrôle des erreurs de transmission de données.

## **9- Différence entre standard et implémentation :**

TCP/IP regroupe en fait deux notions :

- la notion de standard : TCP/IP représente la façon de laquelle les communications s'effectuent sur un réseau.
- La notion d'implémentation : on a parfois tendance à étendre l'appellation TCP/IP aux logiciels basés sur le protocole TCP/IP. TCP/IP est en fait un modèle sur lequel les développeurs d'applications réseau s'appuient. Les applications sont en fait des implémentations TCP/IP.

### **\* TCP/IP est un modèle en couches :**

Afin de pouvoir appliquer le modèle TCP/IP à n'importe quelles machines, c'est-à-dire indépendamment du système d'exploitation, le système de protocoles TCP/IP a été décomposé en plusieurs modules effectuant chacun un rôle précis. De plus, ces modules effectuent des tâches les uns après les autres dans un ordre précis, on a donc un système stratifié, c'est la raison pour laquelle on parle de modèle en couches.

Le terme de couche est utilisé pour évoquer le fait que les données qui transitent sur le réseau traversent plusieurs niveaux de protocoles. Ainsi les données (paquets d'informations) qui circulent sur le réseau sont traitées successivement par chaque couche, qui vient rajouter un élément

d'information puis sont transmises à la couche suivante. Le modèle TCP/IP s'inspire du modèle OSI (modèle comporte 7 couche) qui a été mis au point par l'organisation internationale des standards afin de normaliser les communications entre ordinateurs.

### **10- Présentation du modèle OSI :**

OSI signifie (open système interconnection). Ce modèle a été mis en place par l'ISO afin de mettre en place un standard de communications entre les ordinateurs d'un réseau, c'est-à-dire les règles qui gèrent les communications entre les ordinateurs. En effet, aux origines des réseaux chaque constructeur avait un système propre. Ainsi de nombreux réseaux incompatibles coexistaient. C'est la raison pour laquelle l'établissement d'une norme a été nécessaire. Le rôle du modèle OSI consiste à standardiser la communication entre les machines afin que différents constructeurs puissent mettre au point des produits compatibles (pour peut qu'ils respectent scrupuleusement le modèle OSI).

### **11- Le modèle OSI :**

Le modèle OSI est un modèle qui comporte 7 couches, tandis que le modèle TCP/IP n'en comporte que 4. En réalité le modèle TCP/IP a été développé à peu près au même moment que le modèle OSI, c'est la raison pour laquelle il s'en inspire mais n'est pas totalement conforme aux spécifications du modèle OSI. Les couches du modèle OSI sont les suivantes :

- La couche physique : définit la façon de laquelle les données sont converties en signaux numériques.
- La couche liaison données : définit l'interface avec la carte réseau.
- La couche réseau : permet de gérer les adresses et le routage des données.

- La couche transport : elle est chargée du transport des données et la gestion des erreurs.
- La couche session : définit l'ouverture des sessions sur les machines du réseau.
- La couche présentation : définit le format des données (leur présentation, éventuellement, leur compression et leur cryptage).
- La couche d'application : assure l'interface avec les applications.

## **12- Le modèle TCP/IP :**

Le modèle TCP/IP, inspiré du modèle OSI, reprend l'approche modulaire (utilisation de modules ou couches) mais en contient uniquement quatre.

Comme on peut le remarquer, les couches du modèle TCP/IP ont des tâches beaucoup plus déverses que les couches du modèles OSI, étant donnée que certaines couches du modèle TCP/IP correspondent à plusieurs couches du modèle OSI. Les rôles des différentes couches sont les suivants :

- Couche accès réseau : spécifie la forme sous laquelle les données doivent être acheminées quelque soit le type de réseau utilisé.
- Couche Internet : elle est chargée de fournir le paquet de données (datagramme).
- Couche transport : elle assure l'acheminement des données, ainsi que les mécanismes permettant de connaître l'état de la transmission.
- Couche d'application : elle englobe les applications standard du réseau.

### **a- La couche Internet :**

La couche Internet est la couche la plus important car c'est elle qui définit les datagrammes, et qui gère les notions d'adressage IP. Elle permet l'acheminement des datagrammes vers des machines distantes ainsi que la

gestion de leur fragmentation et leur assemblage à réception. La couche Internet contient 5 protocoles, les trois premiers sont les protocoles les plus importants dans cette couche :

- Le protocole IP.
- Le protocole arp.
- Le protocole ICMP.
- Le protocole RARP.
- Le protocole ICMP.

#### **b- La couche transport :**

Les protocoles de couche précédente permettaient d'envoyer des informations d'une machine à une autre. La couche transport permet à des applications tournant sur des machines distantes de communiquer. Le problème consiste à identifier ces applications. En effet, suivant la machine et son système d'exploitation, l'application pourra être un programme, une tâche, un processus... De plus, la dénomination de l'application peut varier d'un système à un autre, c'est la raison pour laquelle un système du numéro a été mis en place afin de pouvoir associer un type d'application à un type de données, ces identifiants sont appelés ports. La couche transport contient deux protocoles permettant à deux applications d'échanger des données indépendamment du type réseau emprunté (c'est-à-dire indépendamment des couches inférieures...), il s'agit des protocoles suivants :

- TCP : un protocole orienté connexion qui assure le contrôle des erreurs.
- UDP : un protocole non orienté connexion dont le contrôle d'erreur est archaïque.

#### **c- La couche application :**

La couche application est la couche située au sommet des couches de protocoles TCP/IP. Celle-ci contient les applications réseaux permettant de communiquer grâce aux couches inférieures. Les logiciels de cette couche communiquent grâce à un des deux protocoles de la couche inférieure (la couche transport) c'est-à-dire TCP ou UDP. Les applications de cette couche sont de différents types, mais la plupart sont des services réseau, c'est-à-dire des applications fournies à l'utilisateur pour assurer l'interface avec le système d'exploitation. On peut les classer selon les services qu'ils rendent :

- Les services de gestion (transfert) de fichier et d'impression.
- Les services de connexion au réseau.
- Les services de connexion à la distance.
- Les utilitaires Internet divers.

# **CHAPITRE III :**

## **ETUDE DU RESEAU AFDX**

### **1- Introduction :**

L'évolution des techniques des réseaux locaux de transmission de données (Ethernet commuté, ATM, ...) a permis d'apporter de nouvelles réponses aux avionneurs et d'envisager leur utilisation dans ce contexte, même si le caractère nondéterministe des réseaux commutés doit être compensé par des hypothèses fortes, notamment sur les trafics d'entrée du réseau. La solution retenue par Airbus pour la nouvelle génération A 380 consiste à réutiliser les bases de l'Ethernet commuté. Cette technologie permet une réutilisation d'outils de développement et de composants matériels existant pour laquelle il existe une longue expérience industrielle, ce qui permet d'avoir une bonne



confiance en fiabilité du matériel et sur la facilité de sa maintenance. Cette solution est alors standardisée avec la norme ARINC 664 en Ethernet commuté Full Duplex, l'AFDX (*Avionics Full Duplex*), pour adapter les protocoles standard au contexte aéronautique.

L'Ethernet commuté est ainsi mis en application comme architecture de communication pour les systèmes avioniques.

Cependant, cette technologie utilisée comme architecture de communication ne comporte pas de mécanismes internes permettant d'assurer que le réseau offrira bien la qualité de service requise, qui comprend entre autres une latence maîtrisée, ainsi que l'absence de perte de trames par congestion. En effet, les commutateurs prescrits par la norme ARINC

## **2- Architectures des systèmes Avioniques**

Le concept de l'avionique nouvelle, ou avionique modulaire intégrée repose sur l'existence, dans un avion, des sous-systèmes comme le système du train d'atterrissage, le système du fuel, celui des commandes de vol ...etc [Av Hand].

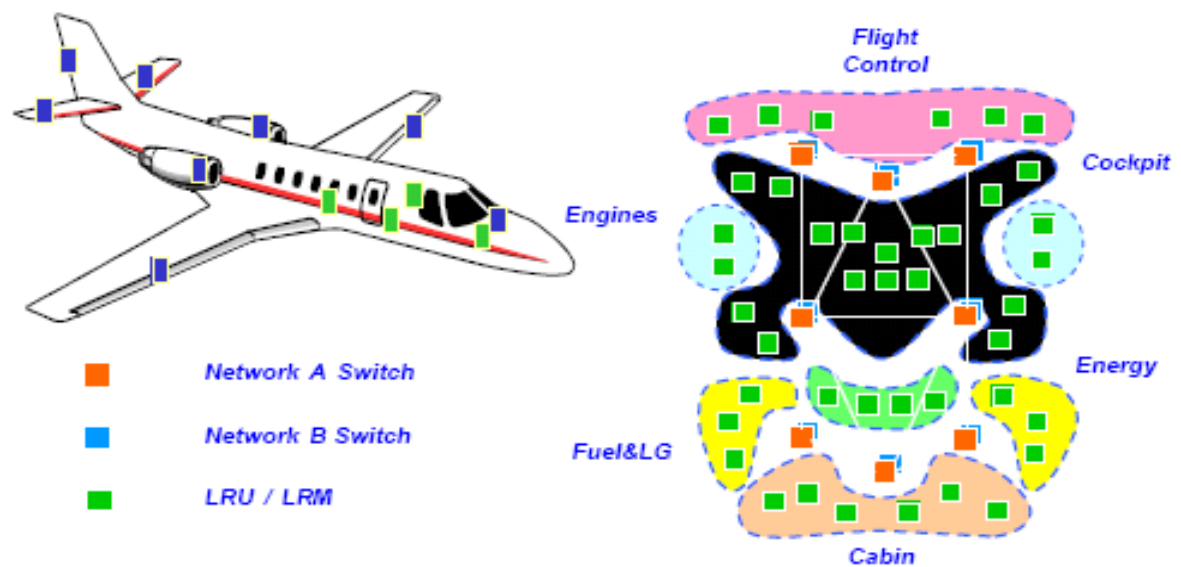
En avionique classique, les équipements sont répartis dans tout l'avion à proximité des sous systèmes qu'ils commandent. Tous ces équipements sont reliés entre eux et au cockpit d'où proviennent les commandes.

L'inconvénient majeur de ce modèle est le poids du câblage très élevé et aussi les coûts des équipements (environ 40% du coût d'un avion).

Contrairement à l'avionique classique (jusqu'à l'Airbus A340), l'avionique nouvelle partage les ressources de calcul et de communication. Le but principal est de réduire les ressources matérielles, de limiter les types de cartes électroniques des systèmes avioniques et de les rassembler dans différents endroits répartis dans l'avion afin de réduire également le poids du câblage.

De nombreuses caractéristiques physiques et architecturales (distribution, asynchronisme, utilisation de ressources de traitement et/ou de communication partagées, etc.) ont un impact aussi sur la conception et les performances des systèmes embarqués.

Les systèmes avioniques sont soumis également à des contraintes très strictes pour garantir la sûreté de leur fonctionnement puisque la moindre défaillance d'un équipement classé critique implique des conséquences catastrophiques. Les systèmes avioniques sont très exigeants en termes de contraintes temps réel strictes, de complexité limitée, de taille, de volume et de poids assez réduits. Ils doivent en outre supporter les conditions de fonctionnement délicat (température, pression, vibration, chocs, environnement électromagnétique).



**Figure 14: Répartition du réseau avionique**

La nouvelle génération des systèmes embarqués pour l'aéronautique civile s'appuie sur le concept d'architecture modulaire intégrée IMA (Integrated Modular Avionics) [KO04].

L'avionique nouvelle, destinée aux futurs avions de la famille AIRBUS, est donc introduite pour résoudre les problèmes inhérents à l'évolution de l'avionique classique. Cette avionique est basée sur une architecture de type "systèmes", toujours distribuée physiquement à travers l'avion [DS01]. La nouveauté qu'elle apporte se présente sous la forme d'une modularisation et d'une standardisation de la plate-forme matérielle où s'exécutent les mêmes fonctions de l'avionique classique. Cette architecture est composée de calculateurs partagés et connectés entre eux par un réseau de communication partagé.

L'aspect mécanique de ces systèmes se présente généralement sous la forme d'un châssis hôte muni d'une interconnexion de type fond de panier, recevant les différents modules qui renferment les fonctions électroniques. Cette conception mécanique permet d'une part, de réduire les coûts de

fabrication pour l'équipementier et d'autre part, de réduire les coûts de maintenance pour l'avionneur.

L'architecture physique est décrite par la norme ARINC 651 [ARI651]. Les ressources sont regroupées dans des modules génériques appelés LRM (Line Replaceable Module), qui sont à leur tour regroupés dans des étagères [DDG95], la communication au sein de ces étagères étant réalisée avec des bus spéciaux, généralement du type ARINC 659 [ARI659].

Les modules peuvent être de trois types:

- Les modules coeurs sont ceux qui se chargent de l'exécution des applications.
- Les modules d'entrée/sortie permettent la communication avec des éléments ne respectant pas l'architecture IMA.
- Les modules passerelles servent à la communication entre étagères.

La tendance actuelle du secteur aéronautique civil et militaire est de s'orienter vers ces systèmes électroniques embarqués. Airbus et plusieurs grands partenaires ont proposé une architecture avionique qui englobe tous les systèmes du réseau, depuis les systèmes de contrôle de l'appareil jusqu'aux systèmes destinés au confort des passagers [VICT].

### **3- L'architecture avionique de l'A380**

Airbus a décidé d'adopter une avionique modulaire sur son dernier né, l'A380. Cette architecture apporte une réponse à un besoin rapidement évolutif, car la vie d'un programme d'avions se compte en décennies, alors que les services demandés par les compagnies aériennes et leurs passagers présentent des cycles beaucoup plus courts. Ce concept facilitera les évolutions futures de l'A380 et devient, pour Airbus, le nouveau standard avionique.

La technologie de l'avionique modulaire adoptée pour l'A380 se fonde sur des ressources configurables (matériel et logiciel basique) capables de recevoir un certain nombre d'applicatifs (calculs, logiques, entrées/sorties) dédiés à des fonctionnalités particulières de l'avion un réseau Ethernet redondant de 100Mbits/s, qui a du être adapté pour pouvoir répondre à des contraintes de criticité.

En dépit du niveau d'innovation proposé, un excellent niveau de maturité a été atteint dès le premier vol. Une multitude de systèmes sont installés à bord de l'avion, dont le but est d'assurer les fonctionnalités nécessaires à la conduite de sa mission et à la sécurité de ses occupants. Le tableau ci-dessous en donne une vision non exhaustive.

|                                      |                                       |
|--------------------------------------|---------------------------------------|
| Conditionnement, pressurisation      | Instruments de bord                   |
| Génération & distribution électrique | Navigation                            |
| Pilote Automatique                   | Surveillance des portes               |
| Commandes de vol                     | Communications                        |
| Antigivrage                          | Protection incendie et fumées         |
| Eclairage                            | Génération & distribution hydraulique |
| Maintenance                          | Train d'atterrissage                  |
| Système de carburant                 | Système propulsif                     |
| Système de freinage                  | Système de démarrage                  |
| Services aux passagers               | Eaux usées                            |

**Tableau 1 : Le constat d'une évolution et la nécessité d'une révolution**

La figure 1 résume l'évolution perçue sur la puissance totale de calcul, le nombre de bus et le volume de logiciels. Pour assurer leurs fonctions, ces divers systèmes disposent de capteurs, de calculateurs, d'actionneurs, d'alimentation en énergie, etc. Chacun de ces systèmes doit donc, en soi, être capable de gérer, d'échanger et de traiter des données.

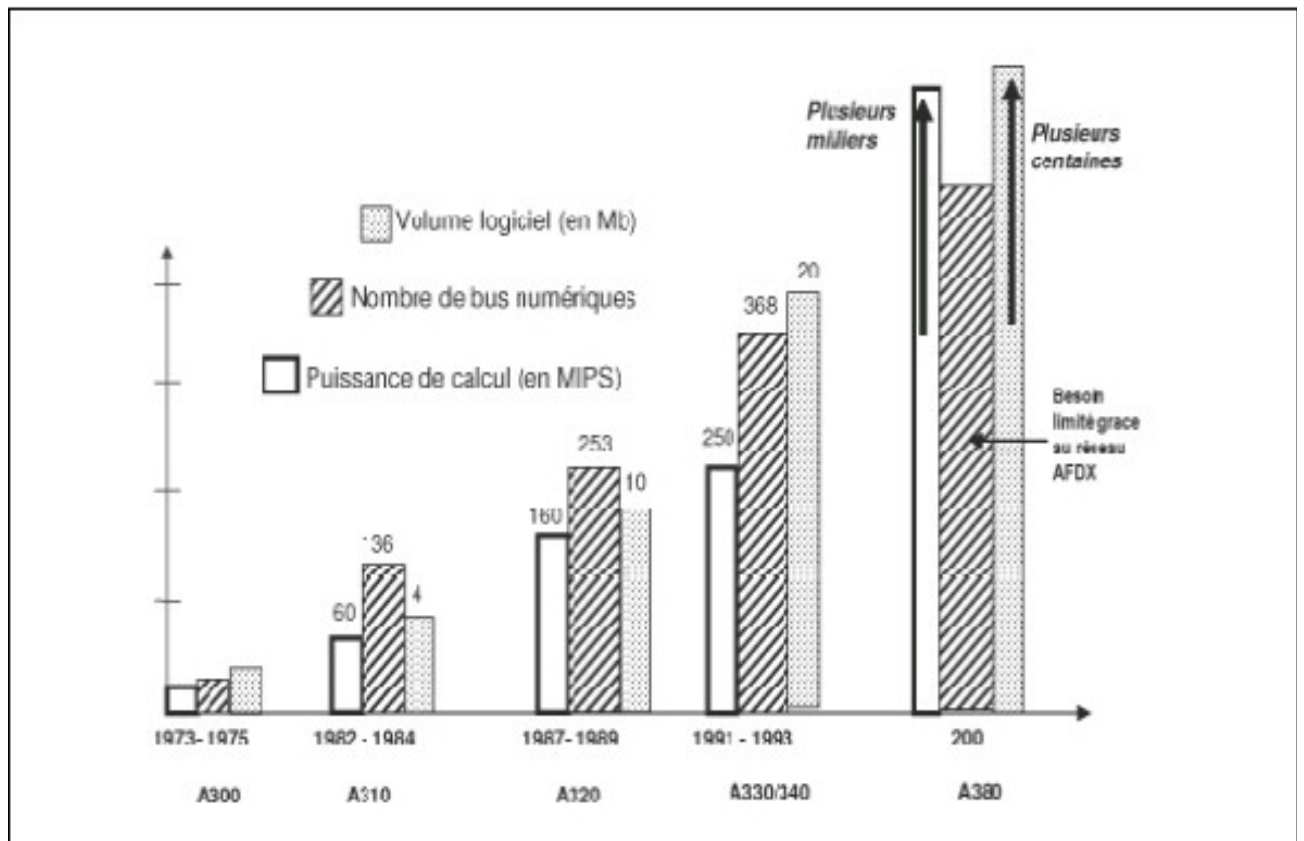
Ceci avait historiquement été réalisé par une électronique dédiée à chacun de ces systèmes, qui avait été désignée sous le barbarisme «avionique», c'est à dire: avion+électronique.

Mais l'augmentation des fonctionnalités demandées a conduit progressivement à une forte inflation du nombre de calculateurs embarqués, qui présente un nombre important d'inconvénients :

- Une masse importante (câblage et calculateurs).
- Une consommation d'énergie (refroidissement des calculateurs).
- Un coût élevé (faibles séries).
- Une fiabilité moindre (nombre élevé de calculateurs).
- Une gestion complexe de l'obsolescence des composants électroniques.

Par ailleurs, les fonctionnalités à assurer devenant plus complexes, il s'ensuit un besoin croissant d'échanges de données entre les systèmes eux-mêmes.

Il apparaît donc clairement un facteur« exponentiel» dans la croissance de l'échange d'information. Cet ensemble de facteurs a créé un fort besoin d'évolution les technologies issues du monde de l'informatique moderne ont permis d'y apporter des réponses. Cependant, les contraintes de l'avionique embarquée ont nécessité un certain nombre de travaux de développement.



**Fig. 15. - Les systèmes électroniques se sont considérablement accrus d'un modèle à l'autre depuis trente ans.**

L'avionique modulaire embarquée a été définie comme une réponse aux défis évoqués ci-dessus. Deux éléments essentiels la composent :

- Des modules (appelés « modules IMA»), standardisés dans leurs composants essentiels, destinés à abriter les divers applicatifs, et à acquérir et échanger des données.

- Un réseau de communication à haut débit, appelé AFDX (Full Duplex Ethernet).

#### **4- Les modules IMA**

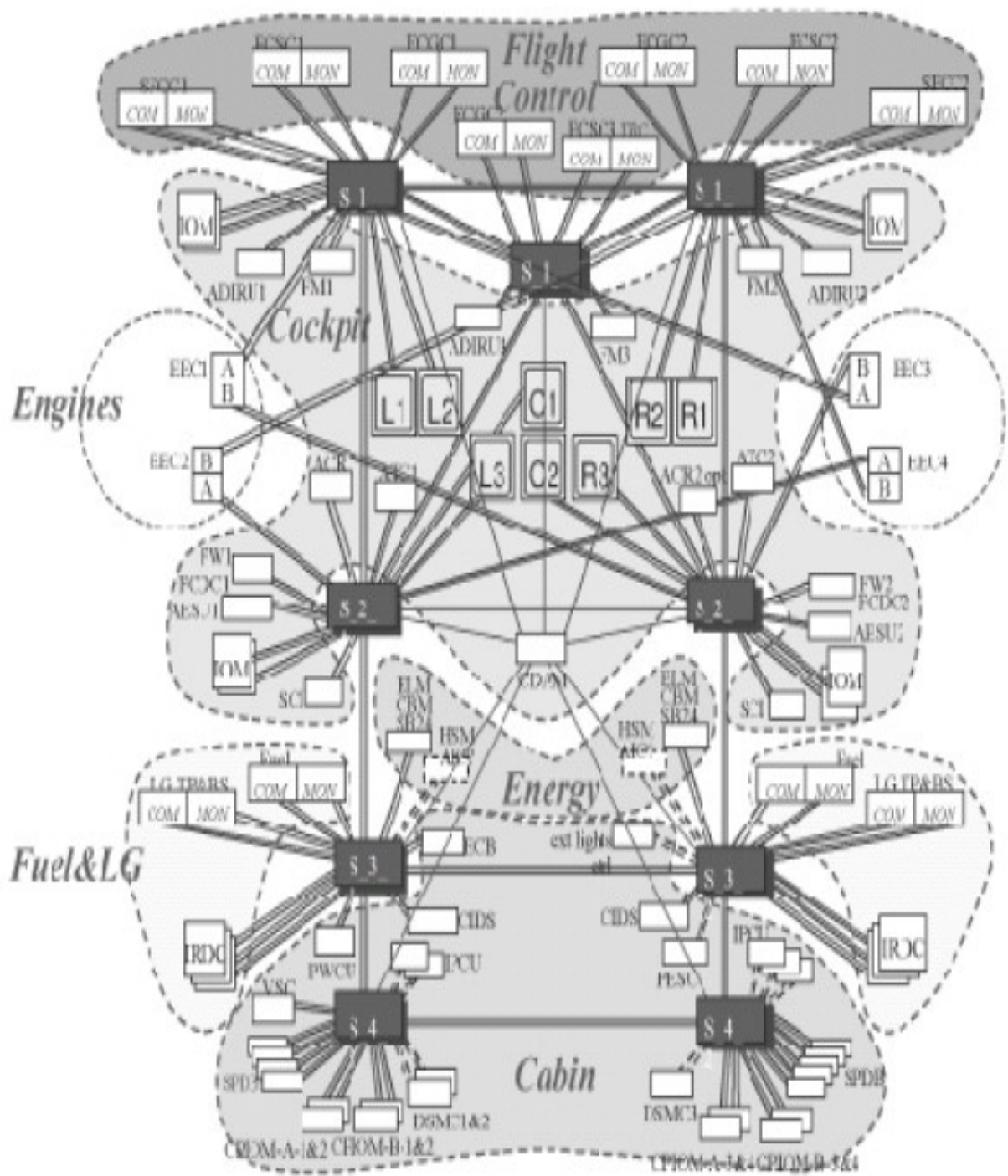
Les séries d'avions commerciaux, même les plus vendus, ne dépassent pas les quelques milliers d'exemplaires. C'est à la fois énorme, si l'on compare ce volume aux premiers programmes aéronautiques européens, et insignifiant, comparé aux productions de l'automobile, de la téléphonie mobile, etc.

Si l'on souhaite pouvoir obtenir une électronique développée de manière industrielle et à un coût acceptable, il est nécessaire de couvrir l'ensemble des besoins de l'électronique embarquée, fort différents d'un système à l'autre, par des composants aussi standardisés que possible. L'approche retenue a consisté à développer 8 composants de base (par exemple boîtier, alimentation, carte CPU, plusieurs cartes d'entrée-sortie...), qui peuvent être assemblés de façon flexible, pour couvrir les besoins de chaque système ou groupe de systèmes particuliers (figures 15 et 16).

La conception de chaque composant est calculée pour que chacun des modules assemblés ait un «MTBF» de 50-000 heures. Par ailleurs, chacun de ces composants de base est conçu avec l'objectif non pas d'échapper à l'obsolescence des composants, ce qui serait vain, mais d'en limiter le risque et de savoir y faire face.

On pourrait ainsi comparer cette stratégie à celle des «assembleurs de PC» qui, à partir d'un certain nombre de composants, peuvent élaborer la machine nécessaire aux besoins spécifiques d'un client. Dans le cas de l'A380, ces 8 composants de base permettent d'assembler les 30 modules nécessaires à chaque avion (le nombre total est dû aux nécessaires redondances). Le fournisseur de chacun des systèmes devra donc élaborer ses applicatifs de manière à les implanter dans ces modules, un même module pouvant ainsi abriter plusieurs applications, provenant éventuellement de fournisseurs différents. Cette stratégie permet une utilisation meilleure des ressources.





**Fig. 16. - L'architecture globale du réseau est particulièrement complexe**

## 5-Le Réseau avionique adopté : Le réseau AFDX du A380

L'AFDX (*Avionics Full Duplex Switched Ethernet*) constitue une des évolutions technologiques majeures de l'avionique de l'A380 [ARI664.1]. En effet, pour la première fois sur un avion de cette catégorie, l'avionique est organisée autour d'un réseau Ethernet redondant et fiabilisé.

Au moment des premières définitions du standard AFDX (autour de 1999), les meilleurs candidats semblaient être la combinaison d'Ethernet et de TCP/IP parmi les technologies issues du marché de l'informatique [DEC05] [FEL05] et ATM parmi les technologies issues du monde des télécommunications. Les critères clefs pour les choix finaux furent les contraintes spécifiques de l'aéronautique (sécurité, problèmes temporels), l'arrivée de la commutation sur Ethernet (inspirée d'ATM) et la taille du marché de l'informatique généraliste face à celui des équipements de télécommunication [ARI646]. Le choix s'est donc porté sur la technologie Ethernet commutée (en mode full-duplex) [FCF-LAN].

|                  | <i>Speed (Bps)</i> | <i>Frame Size (bit)</i> | <i>Frames per second</i> | <i>Minimum of 429 buses to map 100base Tx</i> |
|------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------|---|
| <i>ARINC 429</i> | 100 KHz (max)      | 36                      | 2778                     | 54  |
| <i>ETHERNET</i>  | 100 Mhz            | 12304                   | 812                      | N/A   |

**Tableau 1: Comparaison entre bus ARINC 429 et ETHERNET**

L'utilisation de standards ouverts tel qu'Ethernet a permis de réduire les coûts de développement dans certains domaines. Notamment, dans le domaine de l'instrumentation de laboratoire, des outils standard peuvent être

utilisés sans avoir à développer des outils spécifiques. Au niveau de la conception et du développement, il est également possible de s'appuyer sur des données et une expertise pré-existantes [DEC05] [FEL05]. Toutefois, ces bénéfices sont limités par la nécessité, dans le domaine aéronautique, de disposer de composants éprouvés et certifiés, que les composants commerciaux ne peuvent pas garantir à priori. Certains équipements doivent donc être réalisés spécifiquement pour le marché aéronautique.

Dans le réseau Ethernet commuté, les seules collisions possibles se situent au niveau des liens point à point. Pour éviter de telles collisions, la solution qui a été développée consiste à utiliser des liens bidirectionnels, qui opèrent selon le mode Full Duplex prévu dans la norme IEEE 802.3 [FCF-LAN]. Ce mode d'opération ne nécessite pas de retarder l'émission d'un message, ni même d'écouter ou de réagir à l'activité sur le medium physique, puisqu'il n'y a pas de collision possible sur ce medium. Ceci implique donc que l'utilisation de l'algorithme CSMA/CD n'est plus nécessaire [JNTW02].

### **5-1-La norme AFDX :**

On appelle ce type de réseau un réseau Ethernet commuté Full Duplex [FCF-LAN] [ARI664.7] qui prend en compte les contraintes temps réel et de certification du monde aéronautique [ARI664.2] [BREV03]. En fait, l'utilisation dans un contexte embarqué d'une technologie développée pour un autre contexte moins contraignant nécessite un certain « durcissement », c'est-à-dire une adaptation aux exigences aéronautiques. D'où le nom AFDX : *Avionics Full DupleX switched Ethernet* qui est la version avionique de l'Ethernet commuté Full-Duplex [BT03] [AFS02], l'AFDX est standardisé par la norme ARINC 664 [ARI664.1] [ARI664.23] [ARI664.7]. La norme ARINC 664 couvre aussi d'autres aspects, notamment la prise en

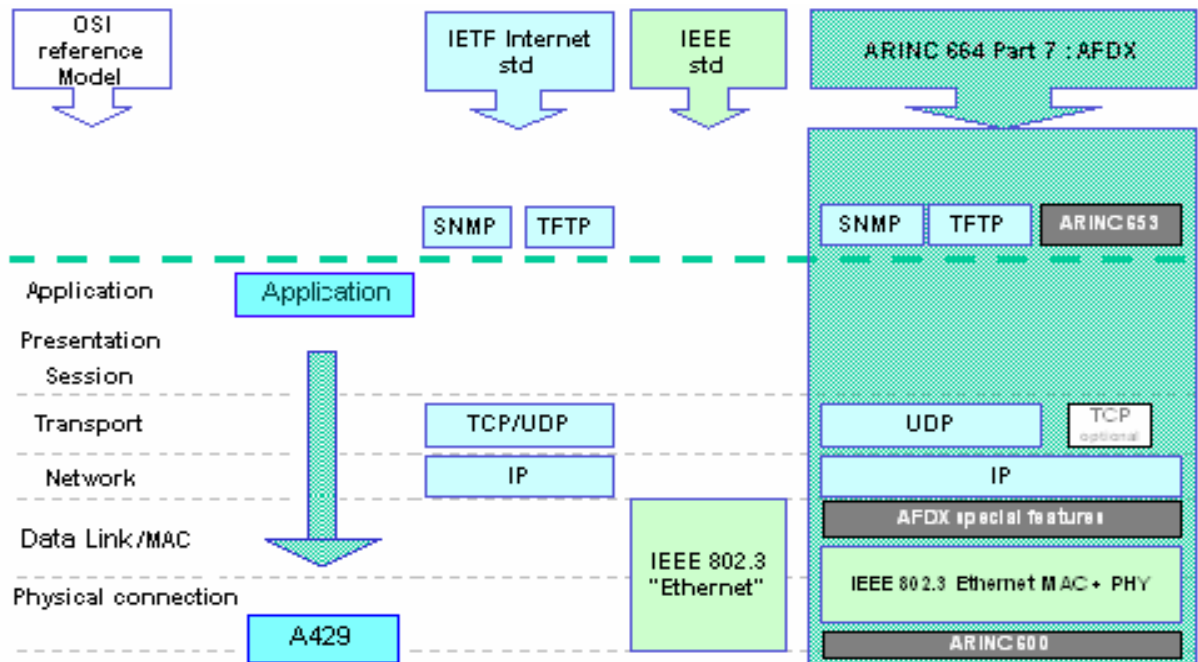
compte ultérieure de besoins de confidentialité ou l'utilisation d'IPv6 (la figure 2 situe l'AFDX dans le cadre du modèle OSI).

Ces réseaux présentent l'avantage de ne plus posséder d'indéterminisme quant au temps d'accès au support physique, et de ne pas entraîner de pertes de trames par collision (dans le paragraphe 2.2.5 on montre qu'il est possible d'avoir des pertes de trames par congestion au niveau des ports de sortie). Par rapport aux réseaux Ethernet classiques, l'architecture Ethernet commuté Full Duplex permet également d'utiliser des liens plus longs. En effet, il n'est plus nécessaire d'écouter l'activité sur le lien physique, donc la limitation sur la longueur de celui-ci n'a plus lieu d'être.

D'autre part, la topologie en étoile permet d'obtenir de meilleures performances en terme de débit pour chacune des stations connectées, puisqu'il n'y a plus de perte de bande passante due aux collisions de trames.

Au delà de la difficulté technique d'une première mise en oeuvre à grande échelle, l'AFDX ouvre les portes à une nouvelle approche systémique de l'avionique et à l'introduction de technologies du monde « ouvert » (lorsque cela a un sens par rapport à la sécurité du vol).

Cette tendance se manifeste notamment par l'adoption d'AFDX par Airbus sur son nouvel avion A380 ou également dans le futur avion militaire A400M, ainsi que l'assentiment de Boeing pour ce nouveau standard [AFDX-CES].



**Figure 17 : L'AFDX sur l'échelle OSI**

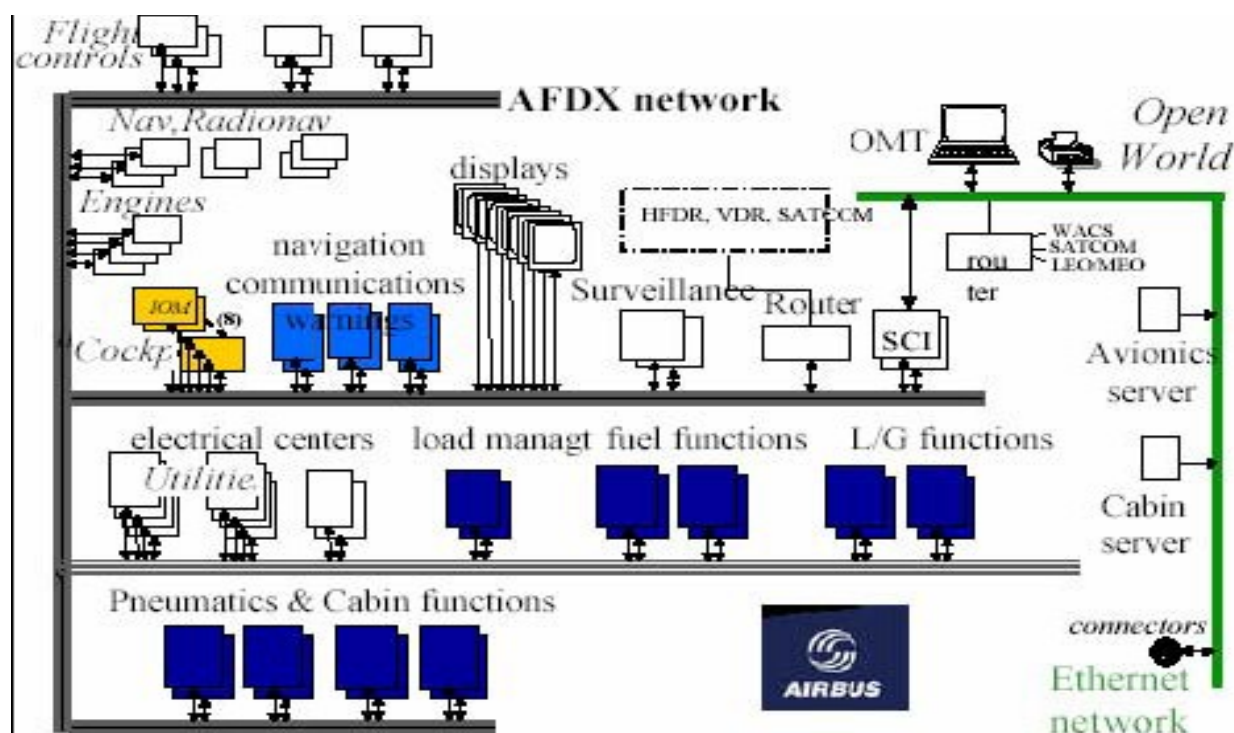
## 5-2-Description de la norme ARINC664 et du domaine d'application

L'AFDX répond aux objectifs d'un système de communication commun pour l'avionique modulaire. C'est une norme basée sur des standards ouverts. Il fournit des moyens de partage de ressources. Il fournit également des moyens robustes de séparation des flux ainsi que le déterminisme et la disponibilité requise, notamment du point de vue des contraintes de certification. La plupart des fonctions spécifiques à l'AFDX (notamment par rapport à Ethernet) sont concentrées au niveau de la liaison des données.

L'AFDX repose donc sur le principe d'un réseau Ethernet commuté. Ce dernier est construit avec des équipements terminaux chargés de l'émission ou de la réception des données et s'organisent autour des commutateurs chargés du transport des données.

La norme ARINC permet alors à toute la communauté aéronautique de réaliser des gains économiques liés à la réutilisation, sans pour autant compromettre les critères de performance très stricts de certaines applications avioniques. Parmi les standards qui seront adaptés, on retrouve principalement l'IEEE 802.3 [IE802.3], 802.1D [IE802.1], et IP [IETF]. La norme décrit l'architecture globale du système d'information embarqué dans un aéronef, et montre notamment comment intégrer des réseaux supportant des applications critiques (liées au contrôle de l'appareil), d'autres réseaux supportant des applications essentielles (gestion de la cabine et des passagers) et des réseaux destinés au confort et à l'occupation des passagers, c'est ainsi qui à développer le réseau AFDX dans un avion et il est représenté dans la fig 18.

Le principal avantage de cette démarche est de fournir à toute l'industrie aéronautique un standard permettant l'interopérabilité à l'intérieur et entre plusieurs réseaux embarqués. La norme suggère que dans le système avionique, les applications devront être regroupées en domaines séparés, avec un domaine par niveau de criticité des applications. On trouvera donc les applications critiques et essentielles regroupées au sein de domaines possédant un réseau profilé ou déterministe, alors que les applications non essentielles seront dans un ou plusieurs domaines possédant un réseau conforme. De cette façon, ces applications pourront réutiliser des logiciels du commerce, qui n'auront pas à être certifiés au sens du DO-178B [DO-178B].



**Figure18: l'architecture globale du réseau AFDX embarqué dans un aéronef**

La conception du réseau de communication avionique est ainsi standardisée comme suit:

- Application et système : les applications et les systèmes qu'utilise le réseau de communication (transfert de fichier, terminal, système de calcul, ... etc.).
- Services : opérations de base fournies par les différentes couches du réseau aux couches adjacentes.
- Protocoles : ensemble de règles qui normalisent la formation des messages échangés entre les différentes couches.
- Caractérisation globale du réseau : réseau ADCN (Aircraft Data Communication System) qui est le système de communication développé pour l'A380, réseau conforme aux normes IEEE 802.3, IETF ( Internet Engineering Task Force) et ARINC 664.

- Interopérabilité:considération de l'interopérabilité pour les deux types de réseaux : conformes (*Compliant Network*) et profilés (*Profiled Network*). Le réseau conforme renferme quelques restrictions concernant l'utilisation et les opérations tandis que le réseau profilé renferme des inconséquences de normalisation serrées.

### **5-2-a- Restrictions imposées pour les réseaux profilés :**

On peut classer les restrictions imposées en trois catégories :

#### ***Configuration statique***

La configuration du réseau doit être statique et entièrement connue avant le décollage. De cette façon, on évite tous les problèmes d'initialisation de réseau, ainsi que l'indéterminisme lié au temps de recherche des adresses, des routes, etc.

Ceci implique entre autres que les tables de commutation (correspondance adresse MAC de destination / port(s) de sortie) doivent être configurées statiquement par l'intégrateur du système. La norme suppose en effet que ces réseaux utiliseront la technologie Ethernet commuté Full Duplex, et que les équipements transmettront des flux de données vers plusieurs destinations (caractère multicast). La commutation sera donc effectuée au niveau 2, sur la base d'adresses de groupe des destinations. De plus, des algorithmes comme l'ARP, le GMRP ou le *Spanning tree* ne sont pas nécessaires dans ce contexte et doivent donc être désactivés.



### *Isolation des erreurs*

De manière générale, le réseau doit assurer un confinement des erreurs, c'est-à-dire qu'une erreur locale ne doit pas se propager et détériorer le comportement d'autres éléments. Ceci implique par exemple un filtrage des trames dans les éléments chargés de les relayer (commutateurs notamment). Ce filtrage permet de supprimer les trames de longueur incorrecte, ou corrompues (vérification du champ FCS), ou dont la source ou la destination ne sont pas identifiées. Une des conséquences de ce filtrage est que les éléments formant le réseau ne doivent pas fonctionner en mode « *cut through* » mais bien en mode « *store and forward* », car les trames ne doivent être relayées que si elles sont valides. Une autre conséquence est que le mode de communication « *broadcast* » est interdit pour tous les équipements.

Le réseau doit également isoler les flux de données les uns des autres : cette exigence oblige à insérer dans chaque trame un champ qui identifie de manière unique le flux auquel elle appartient. Cette identification permet de réaliser des opérations de contrôle de la bande passante, de vérification de l'ordre des trames, ou de détecter des usurpations d'identité. Si des commutateurs sont utilisés dans le réseau, la norme précise que le phénomène de « *head of line blocking* » ne doit pas intervenir : si une trame doit être commutée vers plusieurs ports, et que l'un d'entre eux est bloqué, cela ne doit pas empêcher la commutation vers les autres, ce qui renforce l'isolation des flux. Enfin, la norme précise que le réseau doit implémenter un protocole de surveillance du réseau, qui permet de garder la trace de tous les événements, comme les pertes de trames dans les commutateurs.

### ***Trafic maîtrisé***

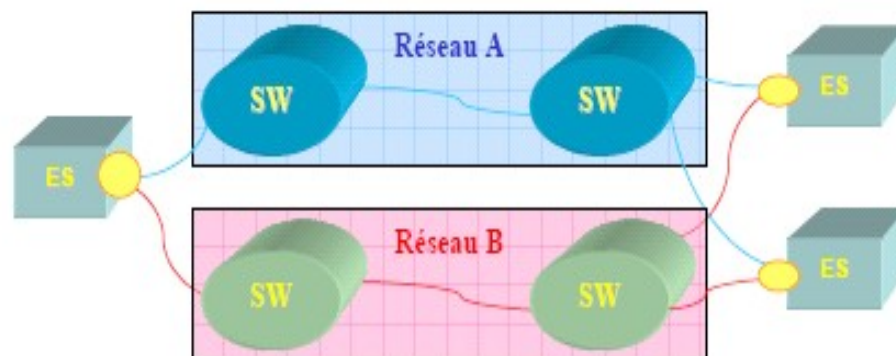
La principale caractéristique des réseaux déterministes au sens de la norme ARINC 664 est que ce sont des réseaux qui garantissent une certaine qualité de service, qui doit être démontrée (cette qualité de service dépend des applications et est déterminée par l'intégrateur du système). Or une telle preuve n'est possible que si le trafic entrant dans le réseau est connu et maîtrisé. Cette exigence fait la spécificité des réseaux déterministes : chaque source doit passer un « contrat de trafic » avec le réseau, et s'engager à le respecter; de son côté le réseau doit mettre en place des dispositifs visant à surveiller que les sources ne dépassent pas leur quota d'émission. Ainsi, les émetteurs de données doivent utiliser des régulateurs de trafic, alors que les commutateurs vont posséder des « policiers » c'est-à-dire des éléments qui rejettent les trames en excès. La norme cite principalement le concept de *Virtual Link*, utilisé par Airbus, que nous décrivons plus explicitement dans le paragraphe 2.2.3.

### **5-3- La Structure du réseau AFDX**

Globalement, le réseau est composé de commutateurs, qui sont les éléments clés de l'architecture, et de producteurs/consommateurs de données, qui sont les applications. Pour chaque application, l'équipement qui sert à se connecter au réseau, et qui gère la communication avec les autres équipements du réseau, se nomme l'*End System* [BT03] [AFS02].

Les commutateurs permettent la ségrégation des flux par un mécanisme de listes de contrôle d'accès (ACL) filtrant le trafic en fonction des adresses (Ethernet ou MAC) impliquées, de manière similaire aux premières générations de *firewall* IP du monde Internet ou aux équipements actuels de coeur de réseau. Afin de répondre au besoin de disponibilité du réseau, un réseau AFDX est physiquement redondant : chaque équipement terminal est

capable d'émettre les messages sur deux canaux différents vers des ensembles indépendants de commutateurs capables d'assurer tous deux la transmission. La figure 19 montre un exemple de connexion entre *End Systems* via un réseau AFDX redondant. Ainsi, une interface d'un *End System* est composée de deux partitions pour les applications, chaque partition dispose d'une adresse IP. L'*End System* fournit différents modes de communication du point de vue avionique avec deux types de ports : Communication port (*Sampling or queuing modes*) et SAP (*TFTP: Trivial File Transfer Protocol*).



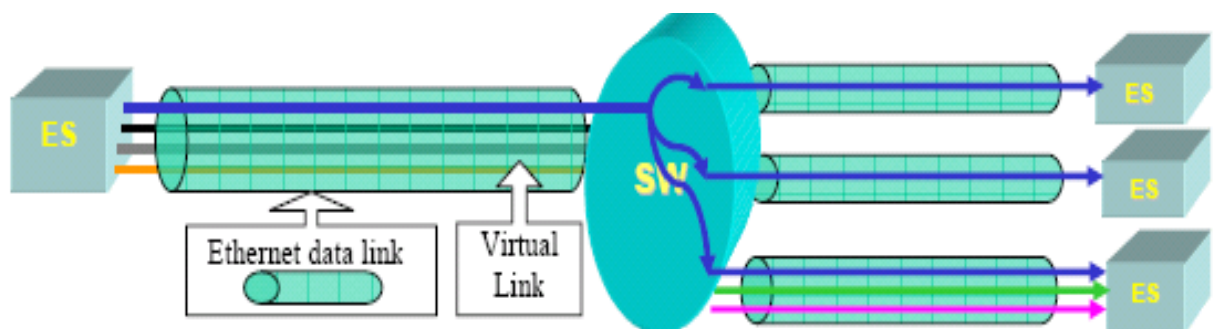
**Figure 19: Redondance du réseau**

#### **5-4- La notion de Virtual Link**

Le réseau AFDX définit, conformément à l'ARINC 664, une notion de canaux de communication virtuels. Le principal moyen de ségrégation robuste des flux est ainsi fourni par la réservation de bandes passantes au niveau d'un canal de communication ou VL (*virtual link*). Ces canaux sont associés à un émetteur et sont diffusés par des adresses de *multicast* (diffusion) Ethernet. Les commutateurs permettent la ségrégation des flux par un mécanisme de listes de contrôle d'accès (ACL) filtrant le trafic en

fonction des adresses (Ethernet ou MAC), de manière similaire aux firewalls IP.

Le concept de lien virtuel permet, par une gestion centralisée des flux, de s'assurer que la somme des bandes passantes allouées aux liens virtuels sur un même lien physique ne dépasse pas les capacités de la technologie de celui-ci. En effet, chaque VL est logiquement isolé des autres. Ces flux sont alors des connexions logiques d'échange entre les différents équipements du réseau où une source peut aussi transmettre des flux vers plusieurs destinations (Multicast). Le lien virtuel VL est ainsi vu comme un "tuyau" sur le réseau, comme illustré sur la figure 20.



**Figure20: Flux de VLs multicasts**

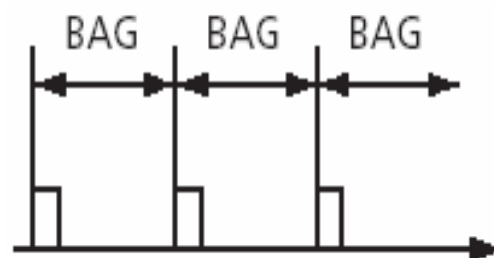
Afin de permettre la gestion des contraintes temps réel sur la transmission des données (pour les systèmes de contrôle), les VLs introduits par l'AFDX sont associés à des spécifications de bande passante (ou « contrats »). Ces spécifications incluent la taille maximale des trames transmises et le temps minimum entre chaque trame.

Ces deux paramètres permettent alors d'évaluer la bande passante maximale autorisée pour un VL particulier. Le respect du contrat est surveillé par les commutateurs du réseau AFDX. Ainsi, le déterminisme des

communications et le contrôle des temps de transmission sont permis à la fois par le respect du contrat de bande passante et par l'utilisation de la commutation Ethernet qui évite les collisions et les ré-émissions (a contrario des concentrateurs Ethernet des générations technologiques précédentes). En résumé, un lien virtuel est donc caractérisé par :

- un sens de transfert, le lien virtuel étant mono-directionnel,
- un équipement source unique,
- un identifiant unique (numéro et nom de VL),
- une ou plusieurs adresses de destination,
- une route empruntée pour rallier ces destinations, un chemin figé sur le réseau,
- une taille maximale et minimale d'une trame (en bits, notées  $s_{max}$  et  $s_{min}$ ),
- un temps minimum d'émission entre deux trames consécutives, appelé BAG

(Bandwidth Allocation Gap). Le BAG est donné par la formule :  $BAG = 1 \text{ ms} \times 2^k$ , avec  $k$  entier de 0 à 7 ; soit 1 ms, 2 ms, 4 ms, 8 ms, 16 ms, 32 ms, 64 ms, et 128 ms.



**Figure 21: Illustration du Bag**

On voit que ces dernières données permettent de définir la bande passante maximale du lien : il ne peut émettre au maximum qu'une trame de taille maximale toutes les BAG.

D'autre part, on peut aussi maîtriser d'une certaine façon le trafic entrant et se propageant dans le réseau. Globalement, l'utilisation des VL permet le calcul des latences de transmission maximales nécessaires pour atteindre les objectifs de certification du système dans le contexte aéronautique. Dans la pratique, ceci conduit également à sous-utiliser les capacités du réseau Ethernet sous-jacent.

Enfin, un flux de données dans le réseau AFDX est identifié avec un ensemble d'adresses de ports UDP/TCP de destination, les adresses IP de destination, les adresses MAC de destination et les connexions Ethernet physiques des *End Systems* de réception. Cela forme une connexion de bout en bout.

## **La norme ARINC :**

### **5-5- Le commutateur AFDX**

Le commutateur est l'équipement le plus important dans le réseau Ethernet commuté. La norme qui définit ces équipements est la 802.1D [IE802.1]. On y apprend qu'un commutateur a trois rôles précis :

- relier et filtrer des trames [IE802.1p],
- tenir à jour les informations permettant de remplir le rôle précédent,
- gérer ces informations et surveiller son fonctionnement interne.

La structure du commutateur AFDX selon le cahier des charges aéronautique impose quelques restrictions sur sa modélisation ainsi que des caractérisations spécifiques liées à son utilisation :

- Un besoin spécifie que le commutateur fonctionne en mode Full Duplex, c'est-à-dire que l'émission et la réception en simultané sont possibles sur chaque port.

- Le processus de forwarding doit être indépendant du port d'entrée de la trame, et doit fonctionner selon le mode « store and forward », ce qui laisse supposer un fonctionnement en deux temps : un premier consacré à la réception de la trame et à son traitement, suivi d'un autre consacré à l'émission sur le bon port de sortie.

- Une trame doit être dirigée vers les bons ports de sortie, et le fonctionnement de ceux-ci est autonome: si un port ne peut émettre la trame, cela ne doit pas empêcher l'émission sur les autres ports.

Certains besoins du cahier des charges permettent de déterminer la valeur des délais, ou de caractériser le fonctionnement des commutateurs:

- Les commutateurs doivent avoir une politique de service conservative (orientée travail) : ils doivent émettre les trames au plus tôt, ils ne doivent pas rester oisifs et doivent émettre dès qu'une trame est en attente.

- Le processus de monitoring n'influe pas les trames qui transitent par le commutateur. Les seuls délais fixes seront donc dus à la réception et au traitement des trames.

- Le filtrage des trames occasionne un délai inférieur à 8 ms.

- L'envoi des trames vers le bon port de sortie occasionne lui aussi un délai inférieur à 8 ms.

Quant aux fonctions du commutateur, un commutateur Ethernet 802.1D peut assumer toutes les fonctions suivantes :

### ***Filtrage des trames***

Le commutateur doit vérifier la conformité de chaque trame qu'il reçoit, selon trois critères :

- Longueur de la trame
- Intégrité de la trame : vérifiée grâce à la méthode classique du CRC.
- Adresse de destination de la trame : Elle doit être enregistrée dans les tables du commutateur comme étant une adresse valide.

Le commutateur doit éliminer toute trame non conforme à l'un de ces critères, et en faire mention dans son journal. Ces mesures permettent notamment de limiter l'influence d'une défaillance d'un élément sur le reste du réseau.

### ***Filtrage du trafic***

Pour chaque VL, le commutateur doit s'assurer que le trafic émis reste dans les limites fixées par le concepteur du réseau. Pour ce faire, il implémente une horloge qui vérifie le temps écoulé entre l'arrivée de deux trames. Si un écart de temps trop court s'est écoulé depuis le passage de la dernière trame, la nouvelle trame est détruite. Ceci permet notamment de bloquer les transmissions d'un abonné défaillant, qui émettrait sans cesse, tout en étant transparent aux autres VL.

### ***Retransmission des trames***

Le commutateur doit regarder le nom du VL auquel appartient chaque trame arrivant, puis le diriger vers le bon port de sortie. Ceci suppose la



présence d'une table qui garantit la correspondance entre les adresses et les numéros de port.

### ***Monitoring***

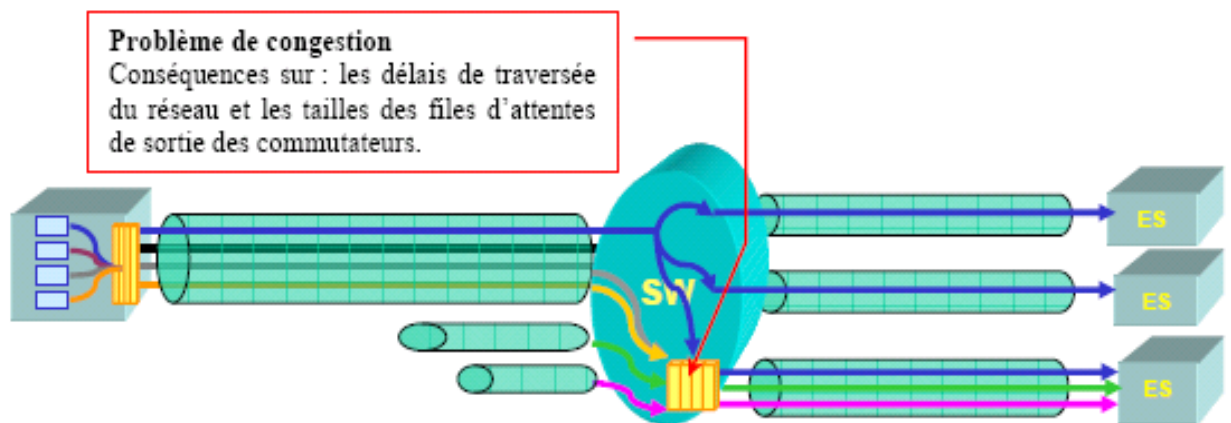
Le commutateur doit en permanence vérifier le bon fonctionnement de tous les liens physiques qui le relie aux abonnés, ainsi que son propre fonctionnement. Il doit être capable de rendre compte de ce fonctionnement à tout moment, notamment en répondant à des requêtes périodiques.

## **5-6 Le problème de non déterminisme dans le réseau AFDX**

Nous avons vu dans les paragraphes précédents que l'évolution de la complexité des systèmes avioniques a conduit les avionneurs à utiliser de nouvelles architectures, et au sein de ces architectures de nouveaux moyens de communication.

Cependant, la technologie utilisée pour ces moyens de communication ne comporte pas de mécanismes internes permettant d'assurer que le réseau offrira bien la qualité de service requise, qui comprend entre autres une latence maîtrisée, ainsi que l'absence de perte de trames par congestion. En effet, les commutateurs prescrits par la norme ARINC 664 sont conformes à la norme IEEE 802.1D, avec laquelle il est possible de perdre des trames par congestion. Ainsi, le problème est décalé au niveau des commutateurs, où les différents flux vont entrer en compétition pour l'utilisation des ressources du commutateur. Les confluences de trafic sont potentiellement sources de non-déterminisme:

- Des délais d'attente importants dus au stockage des trames dans les files d'attente en sortie des commutateurs.
- Une congestion au niveau du port de sortie du commutateur si trop de trafic se dirigent à un instant donné vers un seul port. Ceci va entraîner des pertes de trames par débordement de ces files d'attente. De la même manière, des rafales de trafic, dues à un encombrement passager d'un port du commutateur risquent à leur tour d'encombrer le commutateur suivant, ce qui entraîne également des pertes de trames.



**Figure 22: Le problème de congestion**

Dès lors, il est nécessaire d'étudier si une telle saturation d'une file d'attente pourrait se produire dans le réseau, et le cas échéant si cet événement apparaît souvent dans le cas de trafic réel dans le réseau.

D'autre part, le processus de certification impose à l'avionneur (qui est responsable de tout l'appareil) de fournir aux autorités de certification, la JAA en Europe, la preuve que chaque fonction sera remplie conformément aux exigences exprimées. Le système avionique est bien entendu de niveau critique, et doit être donc certifié suivant les critères les plus stricts.

La complexité de l'ensemble du système rend ce processus complexe. En accord avec les autorités de certification, la démarche retenue a été de certifier séparément le réseau, moyen de communication entre les différents équipements. De cette façon, on sépare en deux parties la complexité du problème : d'une part la question d'exécution de tâches temps réel, d'autre part les problématiques de communication.

On voit ici qu'il est alors fondamental d'étudier si le réseau offre bien la qualité de service requise, qui comprend entre autres la satisfaction des contraintes temporelles (le temps de séjour des trames, la gigue) ainsi que l'absence de perte de trames par congestion.

## **Conclusion**

L'évolution de la complexité des systèmes avioniques a conduit à l'utilisation d'une nouvelle technologie de réseaux embarqués, l'Ethernet commuté Full-Duplex.

Cette nouvelle technologie pose de nouveaux problèmes vis-à-vis de la criticité temporelle des informations circulant sur le réseau avionique. Il s'agit donc de montrer que ce réseau satisfait les contraintes de qualité de service exigées (durée de séjour d'une trame, latence de traversée, ...).