



Photo : auteur inconnu

## Transmission de données

## Avant de débuter le cours ...



**Merci !**

## Présentation du cours



Images : United Airlines



- CPDLC ou CPDL.
- ADS.
- Principe de la modulation de phase.
- Les transmissions numériques.
- VDL – *VHF Data Link*.
- HF DL – *HF Data Link*.
- Cryptage et protection des données.
- *Frequency Hopping*.

## CPDLC ou CPDL



Image : Wikipedia



Image : YouTube

- CPDLC signifie « *Controller-Pilot Data Link Communications* ».
- Il s'agit donc d'un système de communication entre l'équipage d'un aéronef et le centre du contrôle du trafic aérien (ATC) par transfert de données.
- Le CPDLC est implanté dans les zones aériennes fort achalandées afin d'améliorer la fiabilité des transmissions en réduisant la charge de travail.
- Les échanges s'effectuent selon des protocoles et des formats de messages bien définis.
- Toutefois, il existe la possibilité d'effectuer des échanges « *Free Text* » (texte libre).
- La séquence d'un échange s'appelle un « dialogue ».

## CPDLC ou CPDL

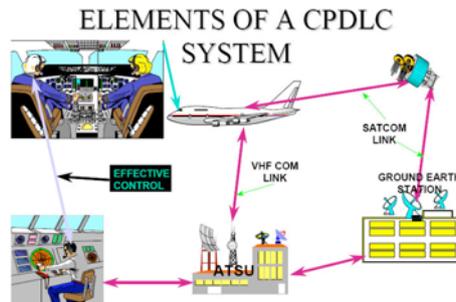


Image : auteur inconnu

- Les liaisons par satellites s'effectuent par Inmarsat (service classique « Aero »).
- Les liaisons VHF s'effectuent selon le protocole VDL 2 par les réseaux d'ARINC et de SITA.

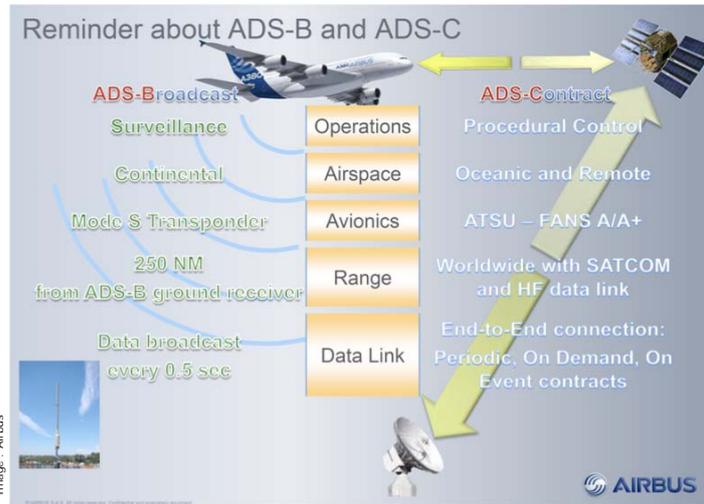
## ADS

- ADS signifie « *Automatic Dependent Surveillance* ».
- Il s'agit de différents moyens mis en œuvre à partir des aéronefs en vol afin de communiquer continuellement leur identité, leur position, leur vitesse ainsi que d'autres informations pertinentes les concernant.
- La transmission est automatique, car elle n'est pas initiée par l'équipage ou par une station au sol.
- Elle est dépendante, car elle dépend de l'intégrité des informations fournies par les différents systèmes de bord de l'aéronef.
- Il existe deux variantes de surveillances dépendantes :

**ADS-B** : *Automatic Dependent Surveillance Broadcast.*  
**ADS-C** : *Automatic Dependent Surveillance Contract.*

## ADS

- Comparaison entre ADS-B et ADS-C :

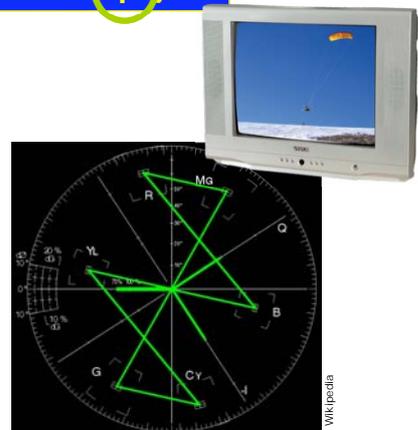


## Principe de la modulation de phase

### La modulation de phase (PM)

$$e = E \sin (\omega t + \varphi)$$

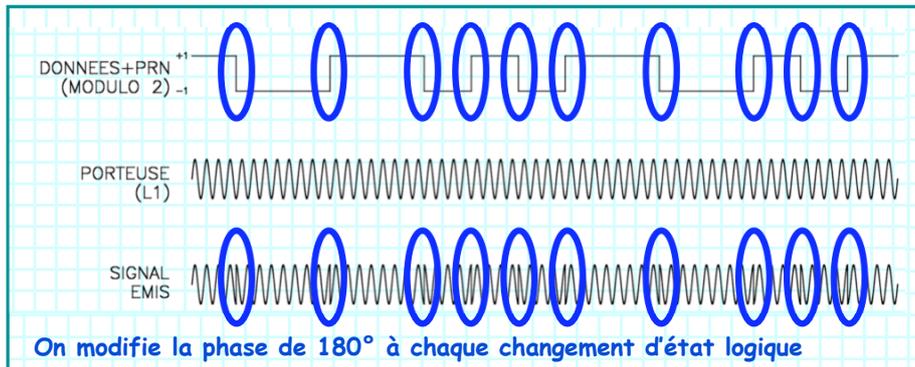
- Les variations de la phase  $\varphi$  en fonction du temps caractérisent la modulation.
- $\varphi = f(t)$ .
- Les variations de la phase de la porteuse transportent toute l'information du signal modulant.
- Le signal de chrominance des télévisions analogiques était, par exemple, modulé en phase.



## Principe de la modulation de phase

### Exemple : la modulation BPSK

- Un exemple de modulation de phase utilisée en aéronautique est la modulation « BPSK-Binary Phase Shift Keying » des données provenant des satellites GPS :



## Les transmissions numériques

### Les transmissions numériques en aviation

- Il existe de nombreuses utilisations de la transmission de signaux numériques en aéronautique :

- Transmissions numériques HF/DL et VDL.
- Communications satellites.
- Bus de données et bus audio numériques.
- ACARS.
- AFIS.
- ADS-B et ADS-C.
- Transpondeurs et TCAS.
- GNSS (Beidou, Galileo, GLONASS et GPS).
- EGNOS et WAAS.
- EFB.
- Internet et applications IFE.
- Communications numériques P25.
- Radiotéléphone.
- Etc.

## Les transmissions numériques

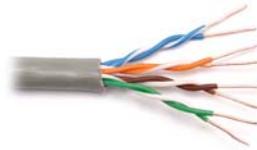
### Méthodes de transmissions numériques

- On peut transférer des données numériques de deux manières :

- Par câble.
- Par liaison radio.

- Lorsqu'on parle de transmission par câbles conventionnels, deux options existent :

**Paires torsadées**



**Câble coaxial**

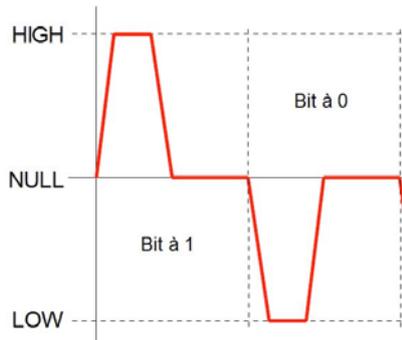


Département d'avionique

## Les transmissions numériques

### Exemple de transmission par câble : Bus ARINC 429

- Codage des bits des mots ARINC 429 :



- Le codage s'effectue avec des impulsions de + 10 VDC (« 1 ») et de - 10 VDC (« 0 ») afin de maintenir une tension moyenne dans le temps nulle.
- Physiquement, un bus ARINC 429 est constitué d'une paire de fils torsadés et blindés.



Wikipédia

Tyco

## Les transmissions numériques

### Techniques de modulation de signaux numériques

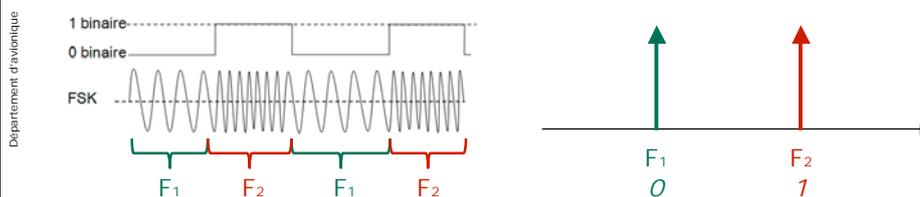
- Pour transmettre un signal numérique par radio, tout comme en analogique, il faut moduler une porteuse.
- On pourrait imaginer transmettre un signal numérique en AM ou en FM comme un signal audio.
- Or, un signal numérique est de forme carrée et la décomposition en série de Fourier nous a appris qu'un signal non sinusoïdal comprenait une infinité d'harmoniques.
- Dès lors, à moins que de moduler un signal à très faible débit (*Baud Rate*, nombre de symboles par seconde), le spectre qui serait occupé pour la modulation AM ou FM d'un signal numérique serait phénoménal et donc irréaliste.
- Il faut donc trouver d'autres méthodes de modulation qui occupent la plus petite bande passante possible.

## Les transmissions numériques

### Techniques de modulation de signaux numériques

- De manière générale, quatre stratégies sont employées pour la transmission de signaux numériques :

#### 1 - FSK – *Frequency Shift Keying* modulation par déplacement de fréquence



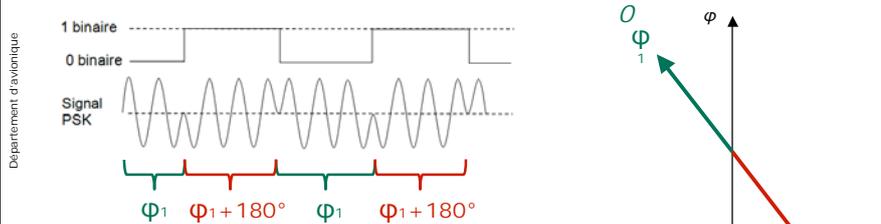
- Au 0 logique correspond une fréquence  $F_1$ .
- Au 1 logique correspond une fréquence  $F_2$ .

## Les transmissions numériques

### Techniques de modulation de signaux numériques

- De manière générale, quatre stratégies sont employées pour la transmission de signaux numériques :

#### 2 - PSK – Phase Shift Keying modulation par changement de phase



- Au 0 logique correspond une phase  $\phi_1$ .
- Au 1 logique correspond une phase  $\phi_1 + 180^\circ$ .

## Les transmissions numériques

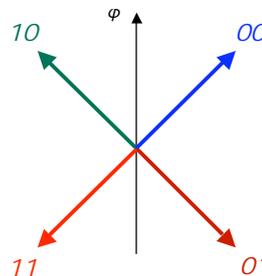
### Techniques de modulation de signaux numériques

- De manière générale, quatre stratégies sont employées pour la transmission de signaux numériques :

#### 2 - QPSK – Quadrature Phase Shift Keying modulation par changement de phase en quadrature

- Une variante du PSK est le QPSK-Quadrature Phase Shift Keying ou 4-PSK.
- Permet des transmissions plus rapides que la BPSK.

Combinaison logique		Phase
0	0	45°
0	1	135°
1	1	225°
1	0	315°



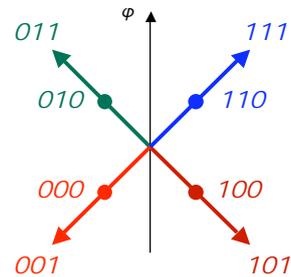
## Les transmissions numériques

### Techniques de modulation de signaux numériques

- De manière générale, quatre stratégies sont employées pour la transmission de signaux numériques :

#### 3 - QAM – Quadrature Amplitude Modulation modulation d'amplitude en quadrature

- Permet d'être encore plus rapide que le QPSK avec un codage de 8 possibilités d'états numériques différents (8-QAM).
- Chaque phase peut avoir deux niveaux d'amplitude.
- On peut également avoir des variantes permettant des transferts encore plus rapides que le 8-QAM : 16-QAM (8 phases, 2 amplitudes), 64-QAM, 256-QAM, etc.

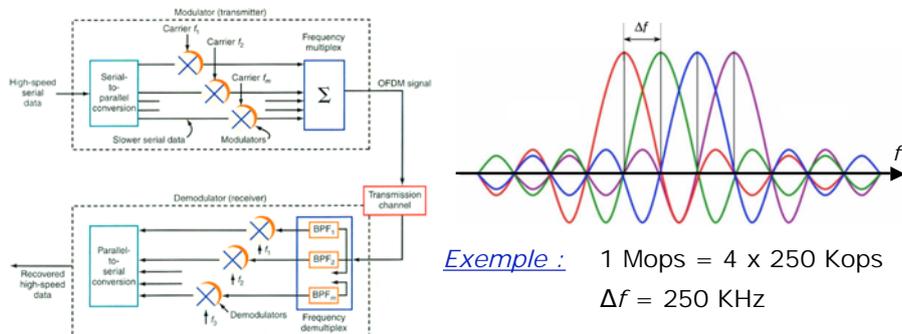


## Les transmissions numériques

### Techniques de modulation de signaux numériques

- De manière générale, quatre stratégies sont employées pour la transmission de signaux numériques :

#### 4 - OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing modulation d'amplitude en quadrature



*Exemple :* 1 Mops = 4 x 250 Kops  
 $\Delta f = 250 \text{ KHz}$

## VDL – VHF Data Link



Photo © Pierre GILLARD/2007-1407

- Parfois aussi connu sous le nom de « VHF Digital Link ».
- Permet d'échanger des messages numériques en utilisant la gamme d'ondes VHF de 118 MHz à 137 MHz entre les aéronefs et le sol ou entre aéronefs.
- Les standards VDL ont été définis par l'Aeronautical Mobile Communication Panel (AMCP) de l'OACI dans les années 1990.
- Il existe quatre modes de communication VDL.

## VDL – VHF Data Link

### VDL Mode 1

- Ce mode a été créé à des fins de validation par l'AMCP.
- Il est semblable au Mode 2 à l'exception du fait qu'il peut être utilisé par une radio VHF-COM conventionnelle analogique.
- Il n'est plus nécessaire actuellement et a été retiré des standards de l'OACI.

## VDL – VHF Data Link

### VDL Mode 2

- Il s'agit de la version principale du VDL validée avec le Mode 1 en 1994.
- Le VDL 2 est implanté en Europe par le programme Eurocontrol Link 2000+ où il est considéré comme de moyen privilégié de transfert de données numériques.
- Ce mode est notamment utilisé pour le CPDLC–Controller Pilot Data Link Communications ainsi que pour l'ACARS-Aircraft Communication Addressing and Reporting System.
- Des réseaux de stations au sol communiquant selon le Mode VDL2 sont implantés et gérés par ARINC (Rockwell Collins) et SITA.

## VDL – VHF Data Link

### VDL Mode 2

- Le Mode VDL2 est structuré selon trois niveaux :

- **Sous-réseau (*Subnetwork Layer*)** : répond aux exigences de l'*Aeronautical Telecommunication Network* (ATN) de l'OACI qui précise le protocole à utiliser de l'expéditeur au destinataire pour une multitude de sous-réseaux air-sol ou au sol, incluant le VDL.
- **Lien (*Link Layer*)** : est constitué de deux sous-niveaux : **Data Link Service** (DLS) et **Media Access Control** (MAC). Le protocole du DLS est basé sur une norme ISO permettant l'établissement d'une liaison effective entre un aéronef et une station au sol. Le DLS définit aussi le format des adresses des stations au sol. Quant au protocole du MAC, il s'agit d'une version du CSMA-*Carrier Sense Multiple Access*.
- **Physique (*Physical Layer*)** : définit les conditions de l'usage d'un canal de 25 KHz d'un VHF-COM avec une modulation 8-DPSK différentielle permettant un taux de transfert de 31,5 Ko par seconde. Nécessite donc une radio permettant la transmission numérique.

## VDL – VHF Data Link

### VDL Mode 3

- Ce mode définit un protocole permettant tant le transfert de données numériques que de la voix numérisée.
- Il a été défini par la FAA.
- L'aspect de la numérisation de la voix rend ce mode plus complexe que le VDL2.
- Les données et la voix numérisée sont transférées par paquets en TDMA-Time Division Multiple Access.
- La FAA n'a pas été convaincante en vue de l'implantation du VDL3 et ce mode a été abandonné en 2004.

## VDL – VHF Data Link

### VDL Mode 4

- Ce mode définit un protocole permettant le transfert de données numériques tant vers des stations au sol que vers d'autres aéronefs.
- Le VDL4 utilise un protocole STDMA-Self-organized Time Division Multiple Access permettant d'éviter de nécessiter une station-maître au sol pour gérer les communications.
- L'implantation du VDL4 est donc plus aisée que le VDL3.
- Le VDL4 est bien adapté pour des communications entre une multitude d'usagers.
- L'idée au départ était d'utiliser les communications VHF pour l'ADS-B, mais, par la suite, celles-ci ont été placées sur les fréquences du transpondeur Mode S (1030 MHz et 1090 MHz).
- En Europe, le VDL4 est essayé malgré tout pour des communications ADS-B In (du sol vers l'avion).

### HFDL – HF Data Link

- L'HFDL est un protocole de transfert de données par ondes HF défini dans la norme ARINC 635-3.
- Le système utilise les modulations 2-PSK, 4-PSK ou 8-PSK avec des taux de transfert de 300, 600, 1200 ou 1800 bauds.
- Les modulations de phase (PSK) utilisent une sous-porteuse à 1440 Hz.
- Les transmissions s'effectuent en USB.
- L'HFDL est géré par ARINC (Rockwell Collins) sous le nom de service « GLOBALink ».
- ARINC dispose de 15 stations réparties sur la surface du globe afin d'assurer une couverture mondiale au service HFDL.
- À bord de l'aéronef, c'est le CMU-Communication Management Unit qui gère le transfert des données de l'HFDL; évidemment, il est nécessaire que le système de radio HF de l'aéronef soit compatible pour le transfert de données.

### HFDL – HF Data Link

- Voici les fréquences porteuses HF utilisées pour communiquer en HFDL avec les 15 stations au sol :

**HF Frequency Table**

Table of ground stations and frequencies of the ARINC GLOBALink HFDL service, Version 01D/29, 2006-05 :

Ground Station	Frequencies in kHz																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
01 San Francisco CA, USA	21934	17919	13276	11327	(10081)	8927	6559	5508	4872	(2947)										
02 Molokai, HI, HWA	21937	21928	17934	(17919)	(13324)	(13312)	(13276)	11348	11312	10081	8936	8912	(6565)	6559	(5514)	(5463)	(4687)	(3434)	(3019)	(2947)
03 Reykjavik, ISL	17985	15025	11184	8977	6712	5720	(3900)	(3116)												
04 Riverhead, NY, USA	(21934)	21931	(17952)	17934	(17919)	13276	11387	(11354)	11315	(10027)	8912	(8885)	8831	(6661)	(6652)	6646	(5652)	(5523)	3428	(3410)
05 Auckland, NZL	(21949)	(17916)	13351	(11327)	10084	(8921)	6535	5583	(3404)	(3016)										
06 Hat Yai, THA	21949	17928	13276	10066	8925	6535	(5655)	(4687)	(3470)											
07 Shannon, IRL	11384	10081	8942	(8843)	6532	5547	(3455)	(2998)												
08 Johannesburg, AFS	21949	13321	8834	4681	3016															
09 Barrow, AK, ALS	(21937)	(21928)	(17934)	(17919)	11354	(10093)	(10027)	8936	(8927)	6646	5544	(5536)	(5529)	(4687)	(4654)	(3497)	(3007)	(2992)	(2944)	
13 Santa Cruz, BOL	21997	(21988)	(21973)	(21946)	(17916)	13315	11316	8957	(6628)	(4660)	(3467)	(2983)								
14 Krasnoyarsk, RUS	(21990)	(17912)	13321	10087	(8886)	(6596)	(5622)	(4679)	(2905)	(2878)										
15 Al Muharraq, BHR	21982	17967	13354	11312	10075	8885	5544	(2986)												
16 Agaña, GUM	(17934)	17919	13339	(13312)	(13276)	11306	(11288)	(8936)	8927	(8912)	(6661)	(6652)	(6634)	(6550)						
17 Teide, Gran Canaria, CNR	21955	17928	13303	11348	8948	6529	5589	2905												

Frequencies in (brackets); assigned but unknown if active.  
The former ground stations 10 (Annapolis, MD), 11 (unknown), 12 (Anchorage, AK) are no longer in service.

## Cryptage et protection des données



Image : Wikipedia

- Pour les applications militaires notamment, il est impératif de crypter les messages transmis par radio qu'ils soient vocaux ou qu'ils consistent en des données numériques.
- Dans le cas de cryptage de la voix, on parle de « *Secure Voice* ».
- Actuellement, la voix est numérisée puis codée.
- Pour ce qui est du transfert de données, celle-ci sont codées sous une forme ou une autre.

## Cryptage et protection des données

- *Exemple* : installation d'un KY-58 à bord d'un aéronef :

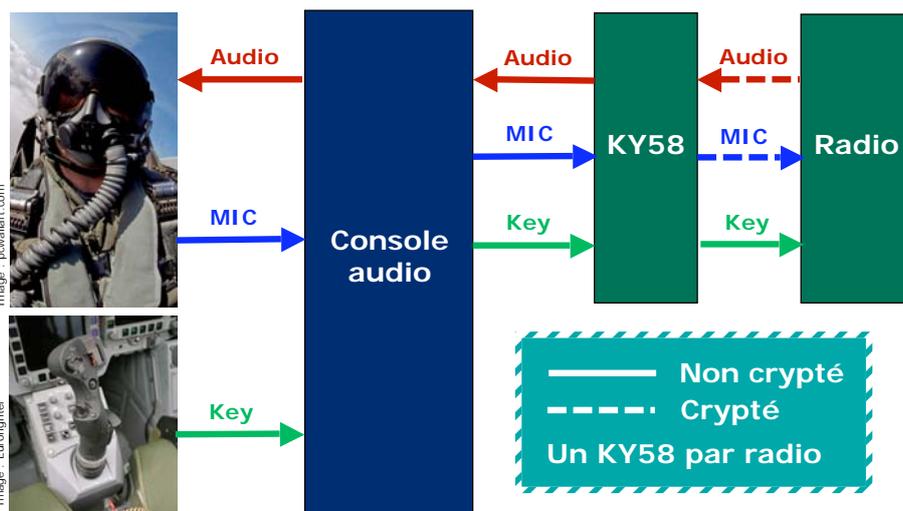
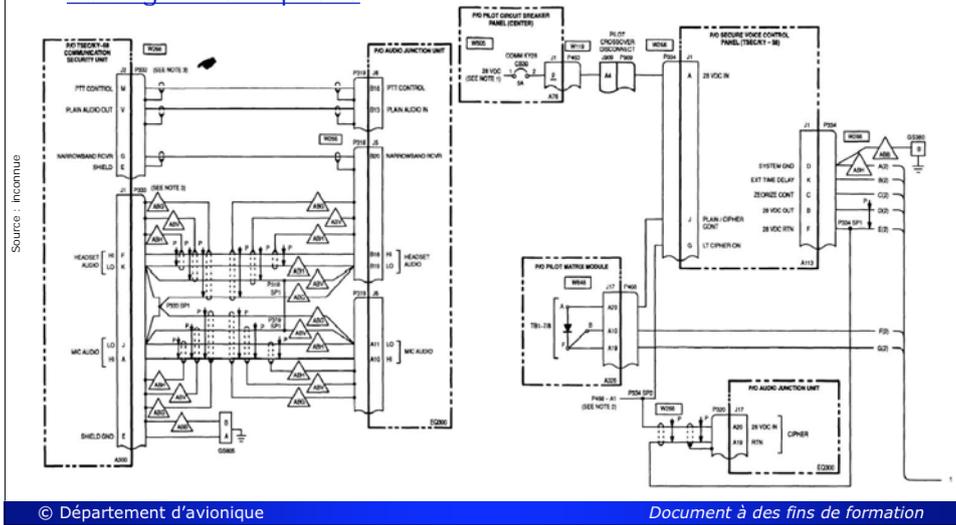


Image : pixellart.com

Image : Eurofighter

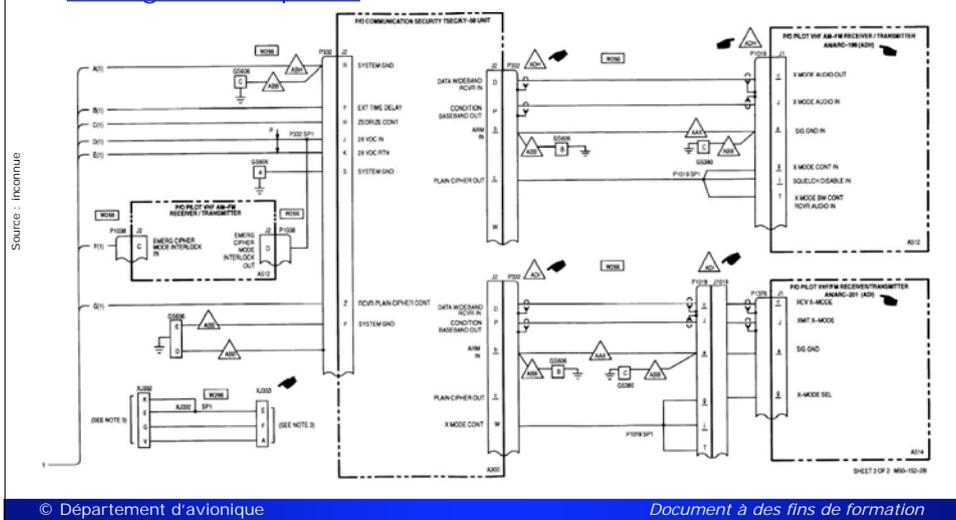
## Cryptage et protection des données

- Exemple : installation d'un TSEC/KY-58 dans un hélicoptère Boeing AH-64 Apache :



## Cryptage et protection des données

- Exemple : installation d'un TSEC/KY-58 dans un hélicoptère Boeing AH-64 Apache :

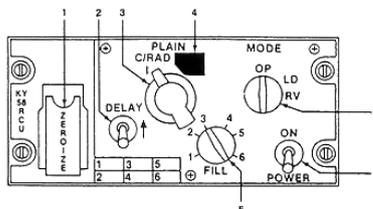


### Cryptage et protection des données

- Exemple : utilisation d'un TSEC/KY-58 dans un hélicoptère :



Photo © Pierre GILARD/2010-26529



Source : Internet

CONTROL / INDICATOR	FUNCTION
1. ZEROIZE switch (two position) momentary toggle, under spring loaded cover.	Zeroize the KY-58; clears any encoding in the system.
2. DELAY switch 2 position toggle.	Used when signal is to be retransmitted.
3. PLAIN-C/RAD switch rotary 2 position selector switch.	In the PLAIN position, permits normal (unciphered) communications on the associated FM radio set. In the C/RAD position, permits ciphered communications on the associated radio set.
4. N/A	
5. FILL switch, 6 position rotary switch.	Permits pilot to select one of 6 storage registers for filling.
6. MODE Switch three position rotary.	In the OP position KY-58 normal operation. In the LD position for filling. In the RV position KY-58 in Receive-Variable. Filled from another external source.
7. POWER ON switch two position toggle.	Connects power to the associated TSEC KY-58 cipher equipment in the ON (forward) position, and disconnects power from the equipment in the OFF (aft) position. Turns on power to TSEC KY-58.

### Frequency Hopping



Image : Rohde & Schwarz

- Pour éviter qu'un ennemi puisse intercepter l'entièreté d'un message radio, l'émetteur change de fréquence porteuse en cours de transmission.
- À la réception, il est nécessaire de connaître la succession des fréquences porteuses utilisées afin de reconstituer le message.
- La technique est aussi connue sous le nom de « Have Quick ».
- Cette technique n'est pas considérée comme du cryptage; pour une même transmission, il peut y avoir simultanément du cryptage et du Have Quick.

## Frequency Hopping

- Trois éléments sont nécessaires pour synchroniser un émetteur et un récepteur en mode *Have Quick* :

**TOD- Time of Day** : référence de temps très précise provenant en général d'un récepteur GPS.

**WOD- Word of the day** : clé du jour.

**NET Number** : permet une sélection de modes et l'usage du même WOD par plusieurs réseaux distincts.

- Ces trois éléments sont intégrés dans un nombre pseudo-aléatoire cryptographié qui permet aux émetteurs-récepteurs de contrôler le changement de la fréquence porteuse dans le temps.
- Actuellement, le système a été amélioré et existe sous le nom de « *Have Quick II Phase II* ».
- Pour les radios UHF-AM, il existe également le système SATURN utilisant la technique de *Frequency Hopping*.

## Frequency Hopping

- Exemple de radio : Rohde & Schwarz MR6000L



### Brief Description

The R&S®MR6000L radio, which comes in an ARC-164 housing, is installed in the cockpit and is controlled via a local control panel. Despite weighing less than 4 kg, the R&S®MR6000L offers outstanding reception and transmission performance.

The R&S®MR6000L display comes with a choice of white, red or NVG-compatible illumination.

### Key Facts

- Choice of frequency hopping methods: HAVE QUICK III, SATURN or HAVE QUICK I/II and R&S®SECOS in a single device
- Embedded R&S®SECOS encryption
- Tactical VHF frequency range for communications with ground troops (i.e. expanded frequency range from 30 MHz to 399.975 MHz)
- High transmit power of 10 W (AM) and 15 W (FM)
- Remote control via RS-485 interface and applicable Rohde & Schwarz protocol (used by the R&S®GB6500 for example), MIL-STD-1553B data bus or a combination of both

### Features & Benefits

The R&S®MR6000L series has the following features:

- Additional guard receiver for the 40.5 MHz, 121.5 MHz and 243.0 MHz distress frequencies
- Direction finding and homing support for locating transmitters in the VHF and UHF ranges
- Option of loading encrypted R&S®SECOS encryption keys (black key loading)
- Immunity to VHF broadcast transmitter interference
- Legacy ARC-164 radios can be replaced with the optional ARC-164 serial or parallel interface without additional integration effort



***Merci de votre attention***