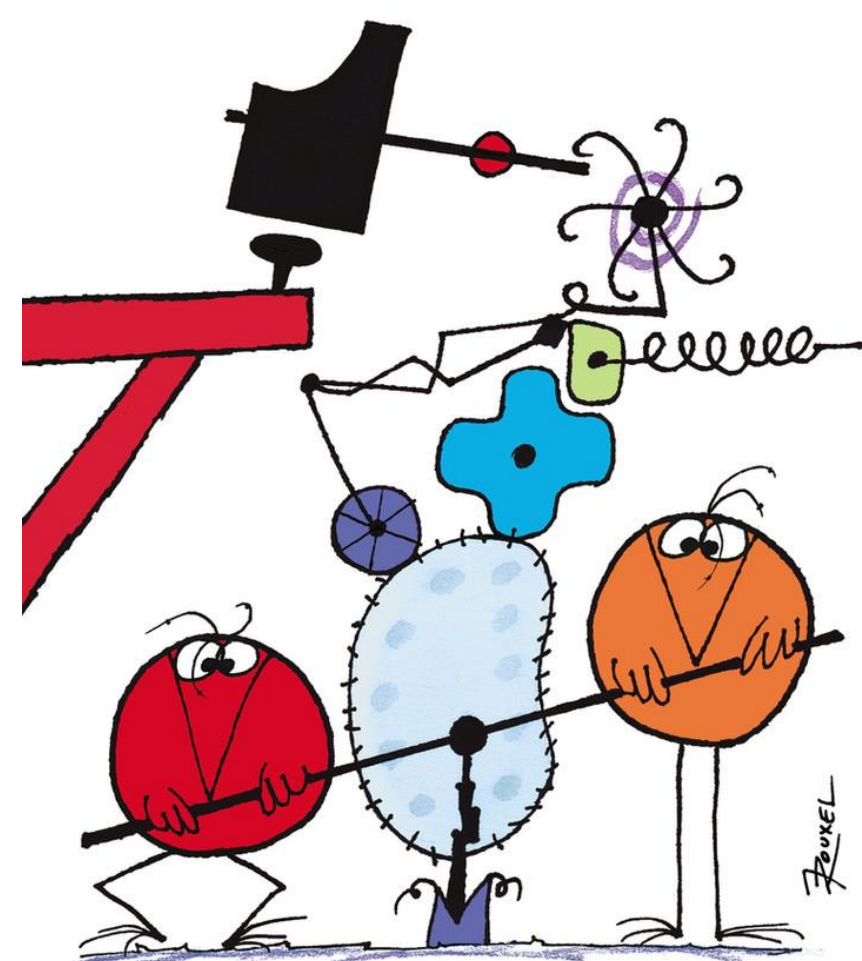


Mers :



ou

LE MONDE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS



POURQUOI FAIRE SIMPLE QUAND ON PEUT FAIRE COMPLIQUÉ ?!

par Jean Pierre SANTURETTE

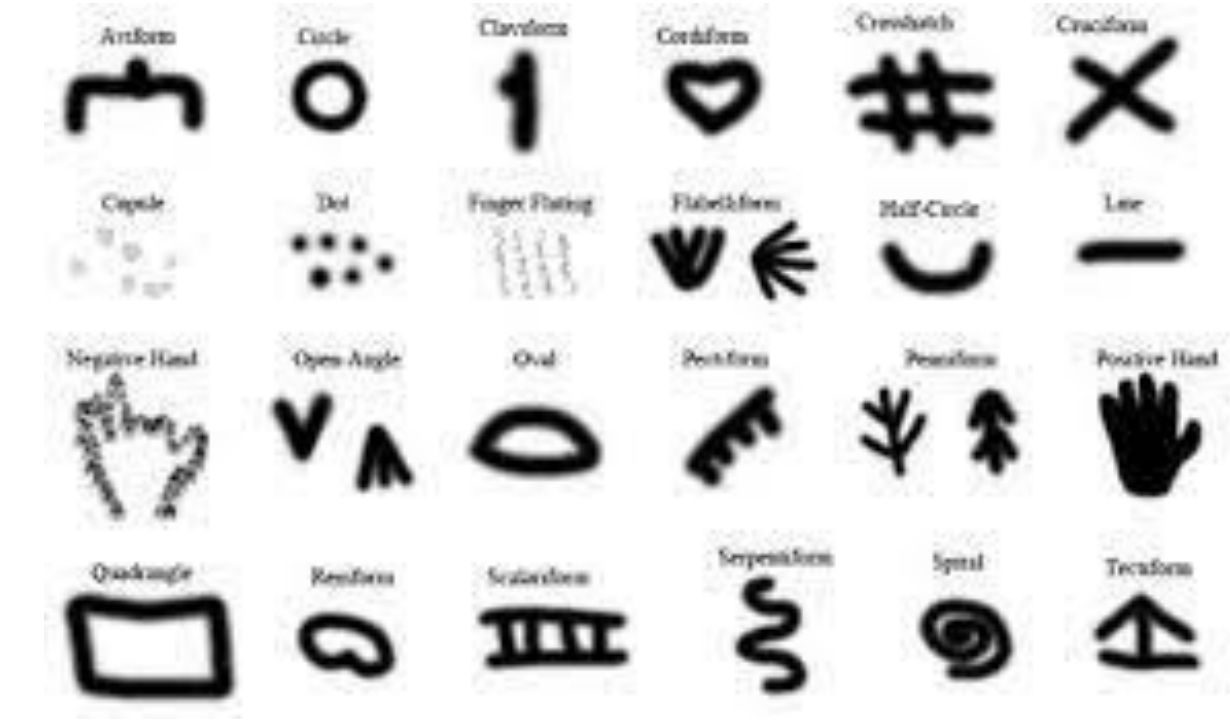
.....et jfDB

L'électronique ça marche jamais !!



Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- Au début , il y avait ça :



- Puis on a inventé le feu / la fumée

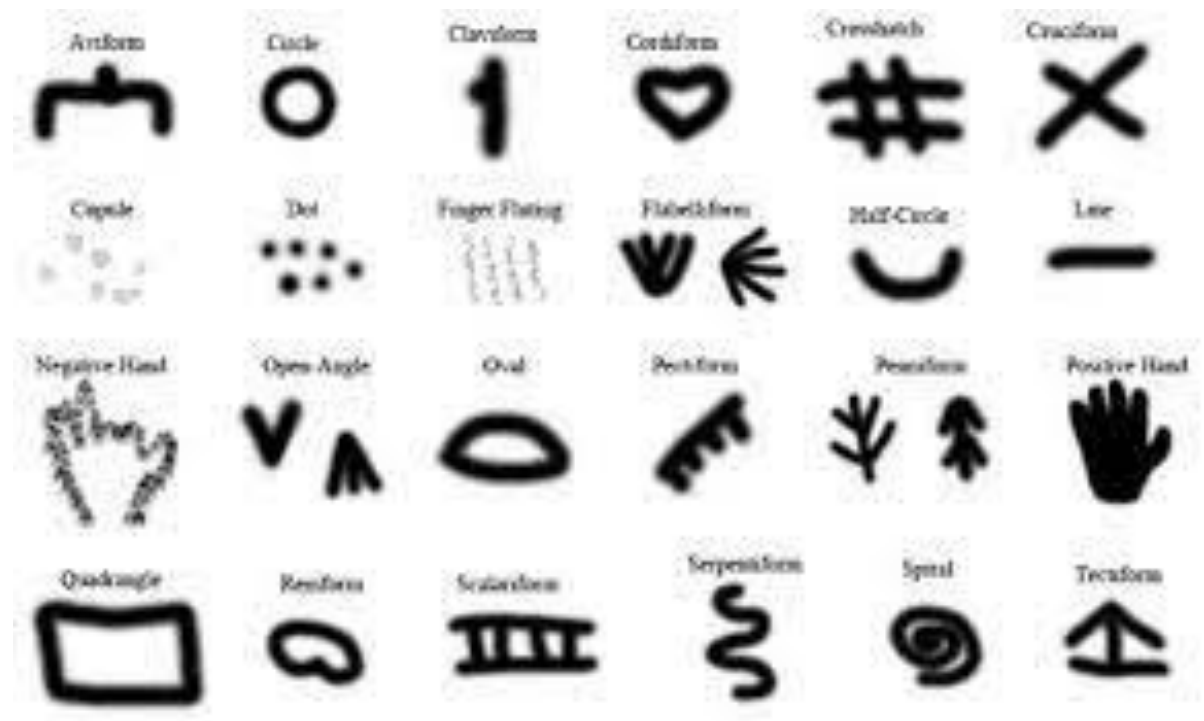


Moi , j'n'y vois rien avec ces signaux !



Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- ... et le Tamtam puis les Signes , le Dessin , la Peinture , la Sculpture , l'écriture

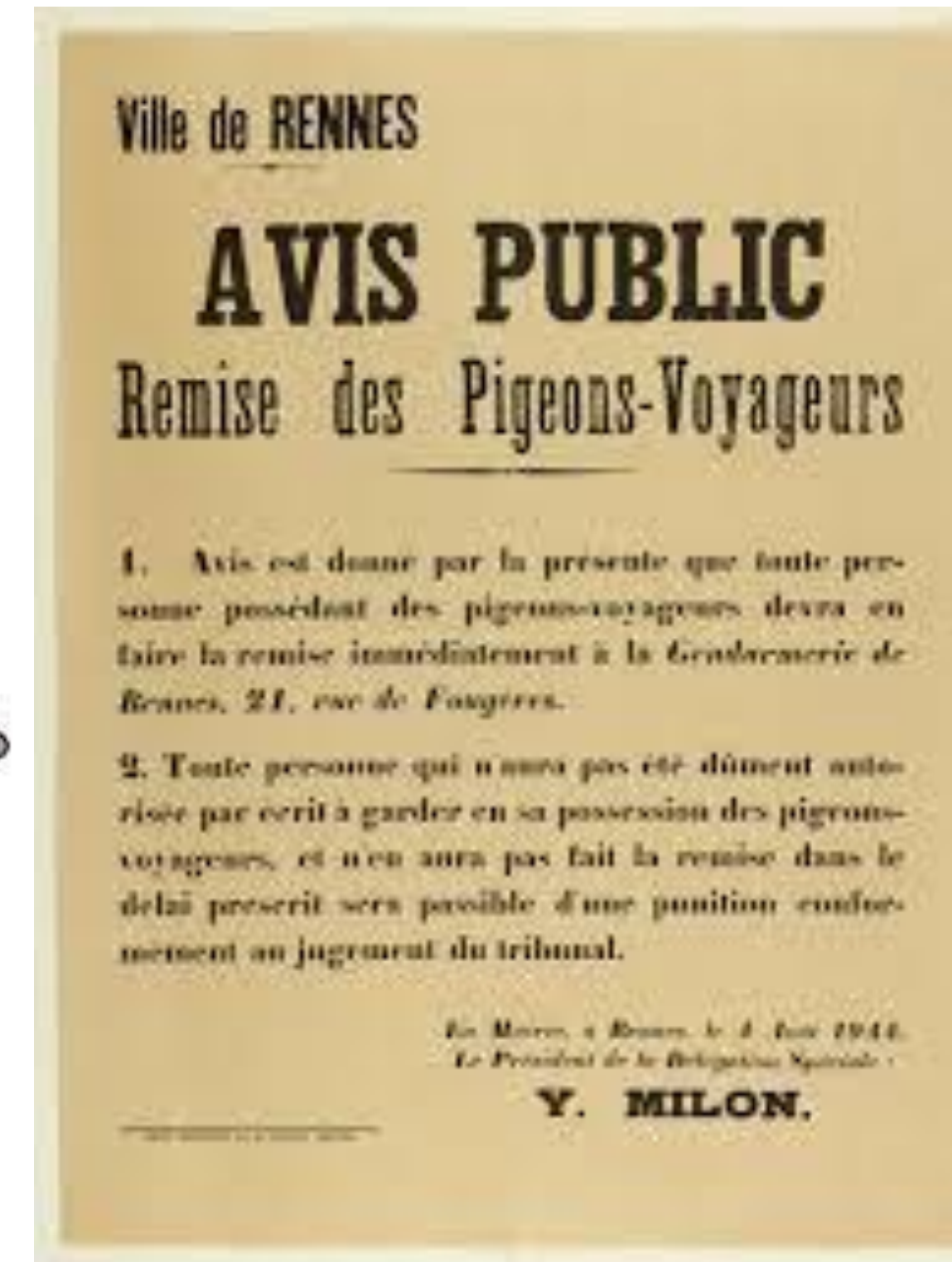


- ... les messager ... puis



Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- ... puis les pigeons (... beaucoup plus tard !)



- ... puis ...



Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- ... les tours à Signaux , et le codage puis



- ... la Technologie est apparue



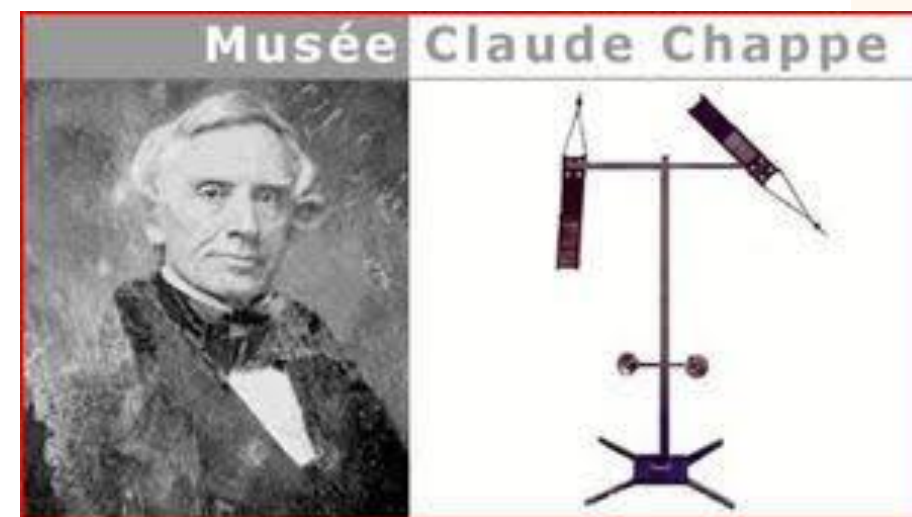
Le code Morse international

A	---	K	---	U	---	0	---
B	---	L	---	V	---	1	---
C	---	M	---	W	---	2	---
D	---	N	---	X	---	3	---
E	---	O	---	Y	---	4	---
F	---	P	---	Z	---	5	---
G	---	Q	---			6	---
H	---	R	---			7	---
I	---	S	---			8	---
J	---	T	---			9	---



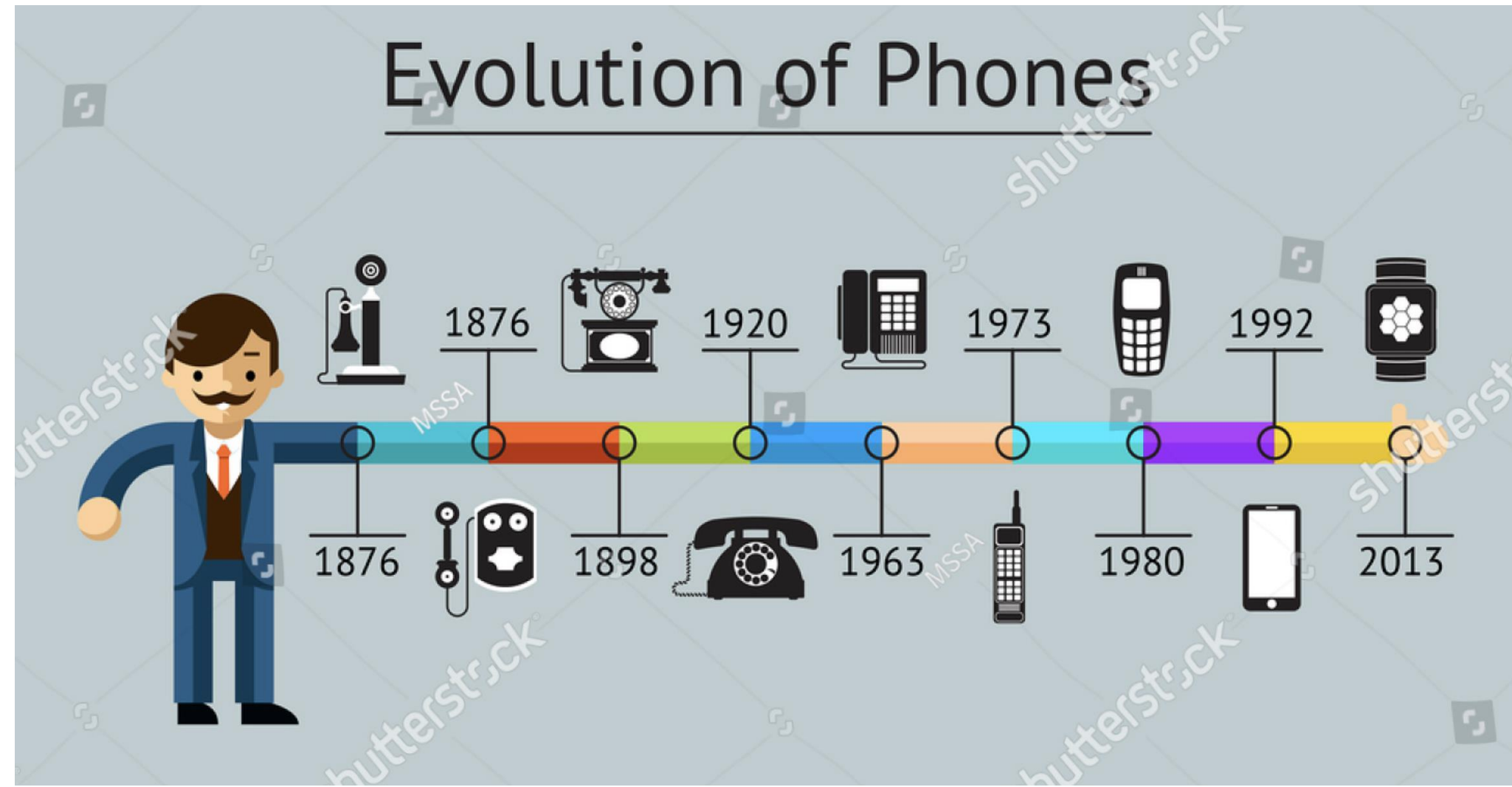
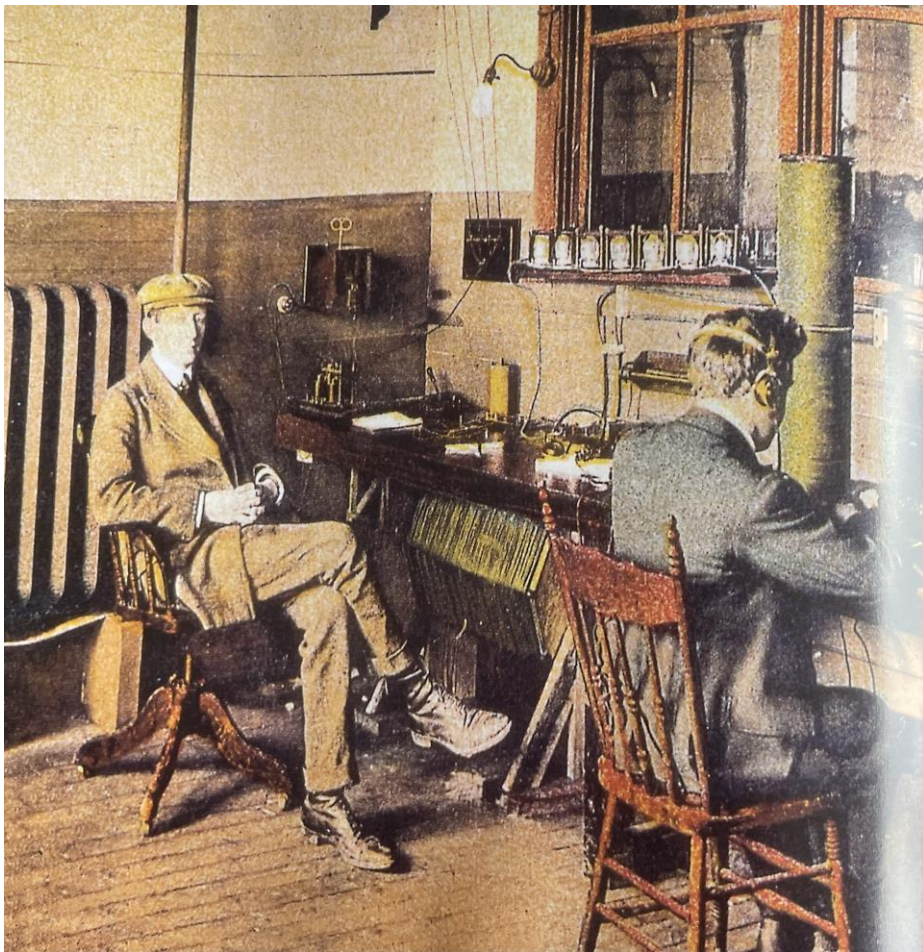
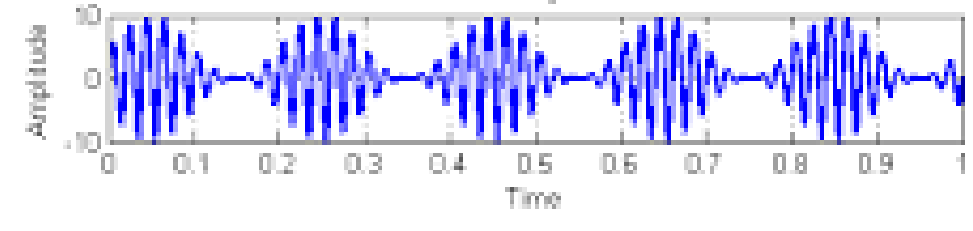
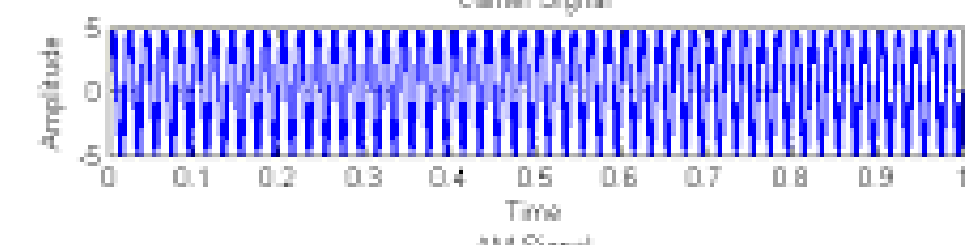
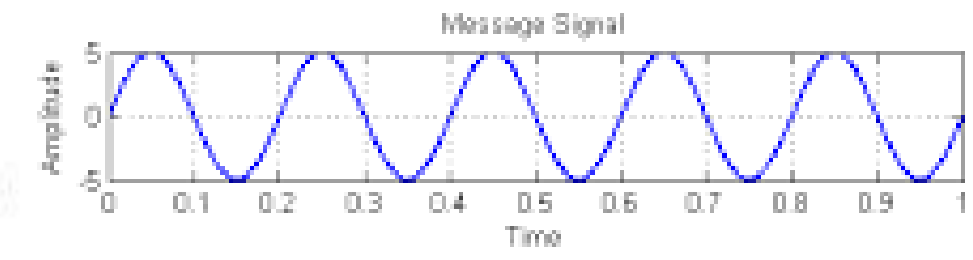
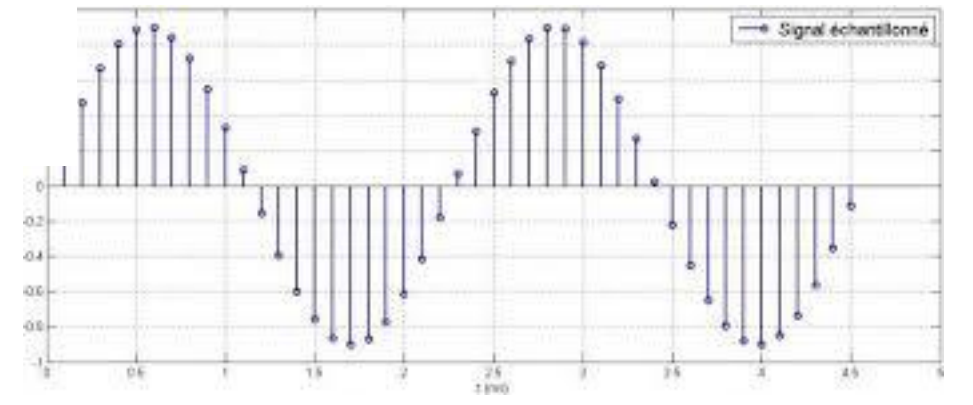
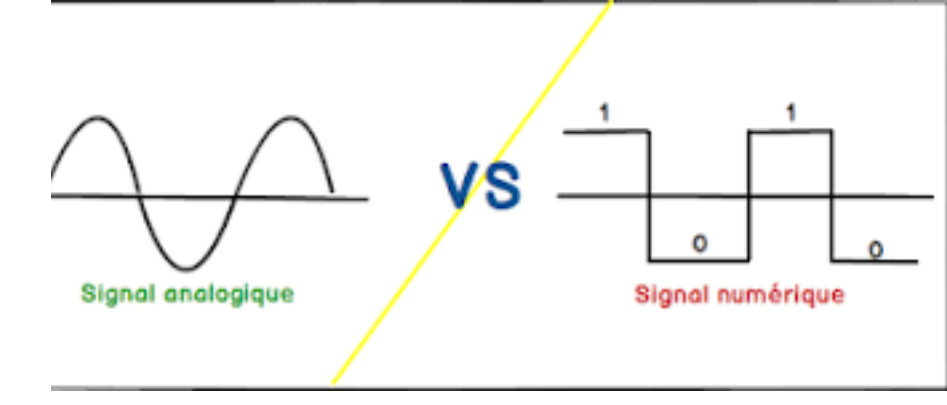
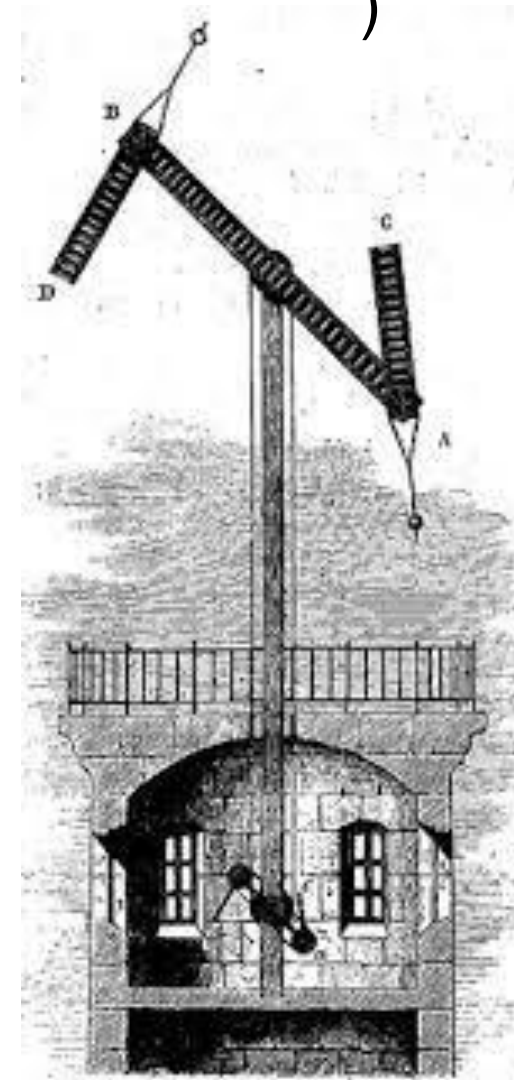
Télégraphe de Chappe

- 1^{er} réseau de télécommunications à envergure nationale
- Créé en 1794 avec la ligne Paris-Lille
- Télégraphe optique

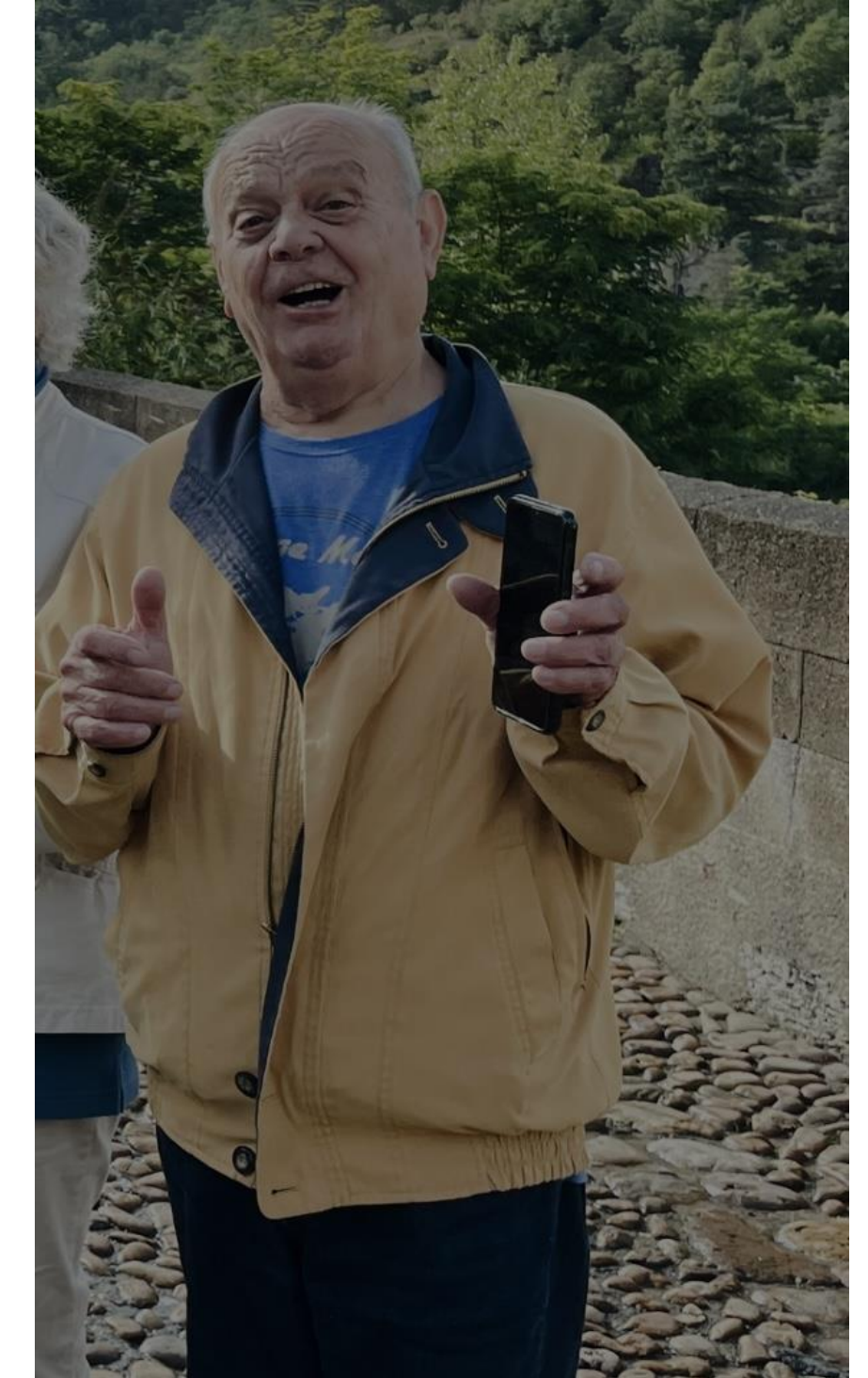


Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- ... la Technologie , la Science , le **PROGRES** ... (.... OUI, serte , mais ça se discute ...)



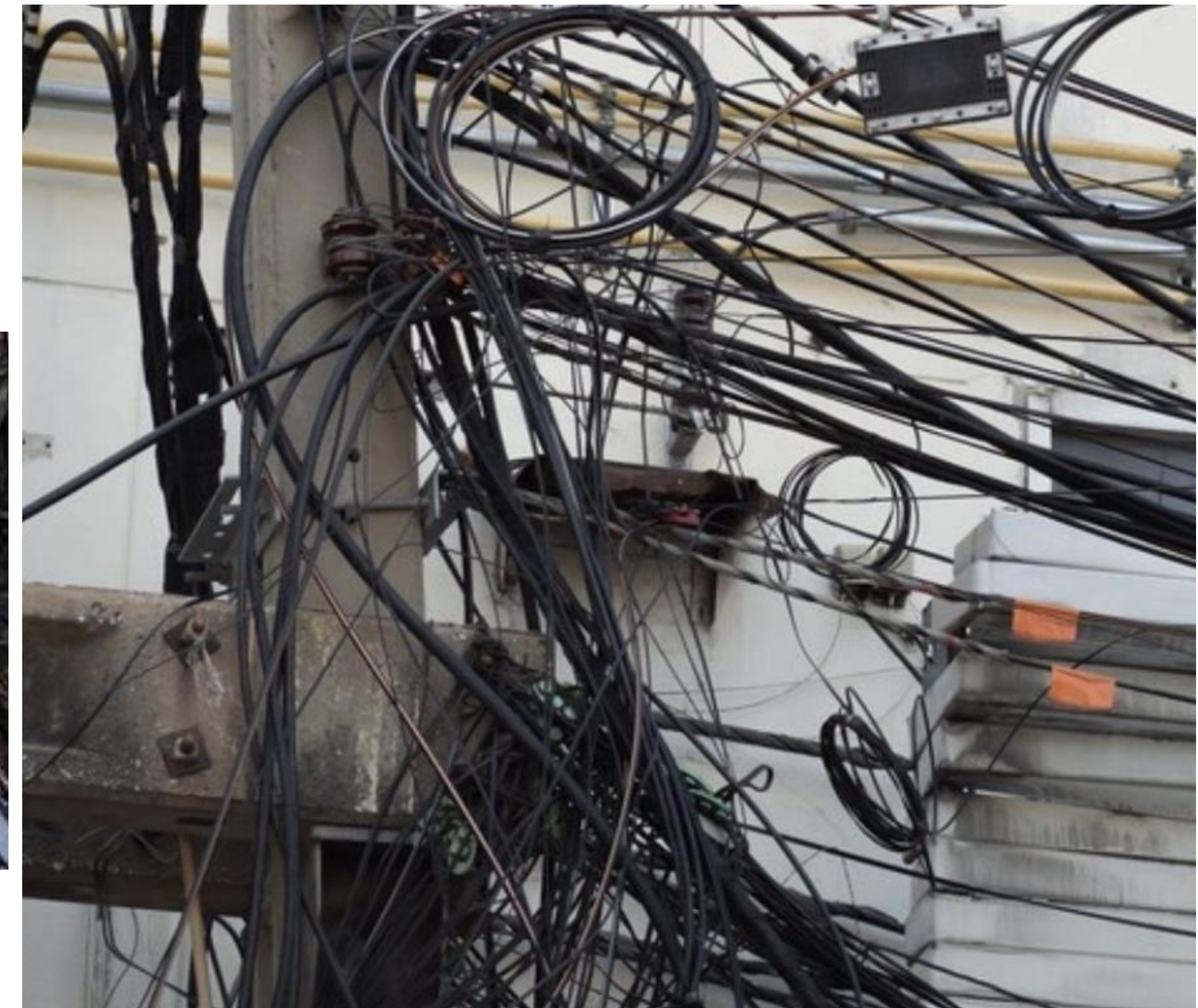
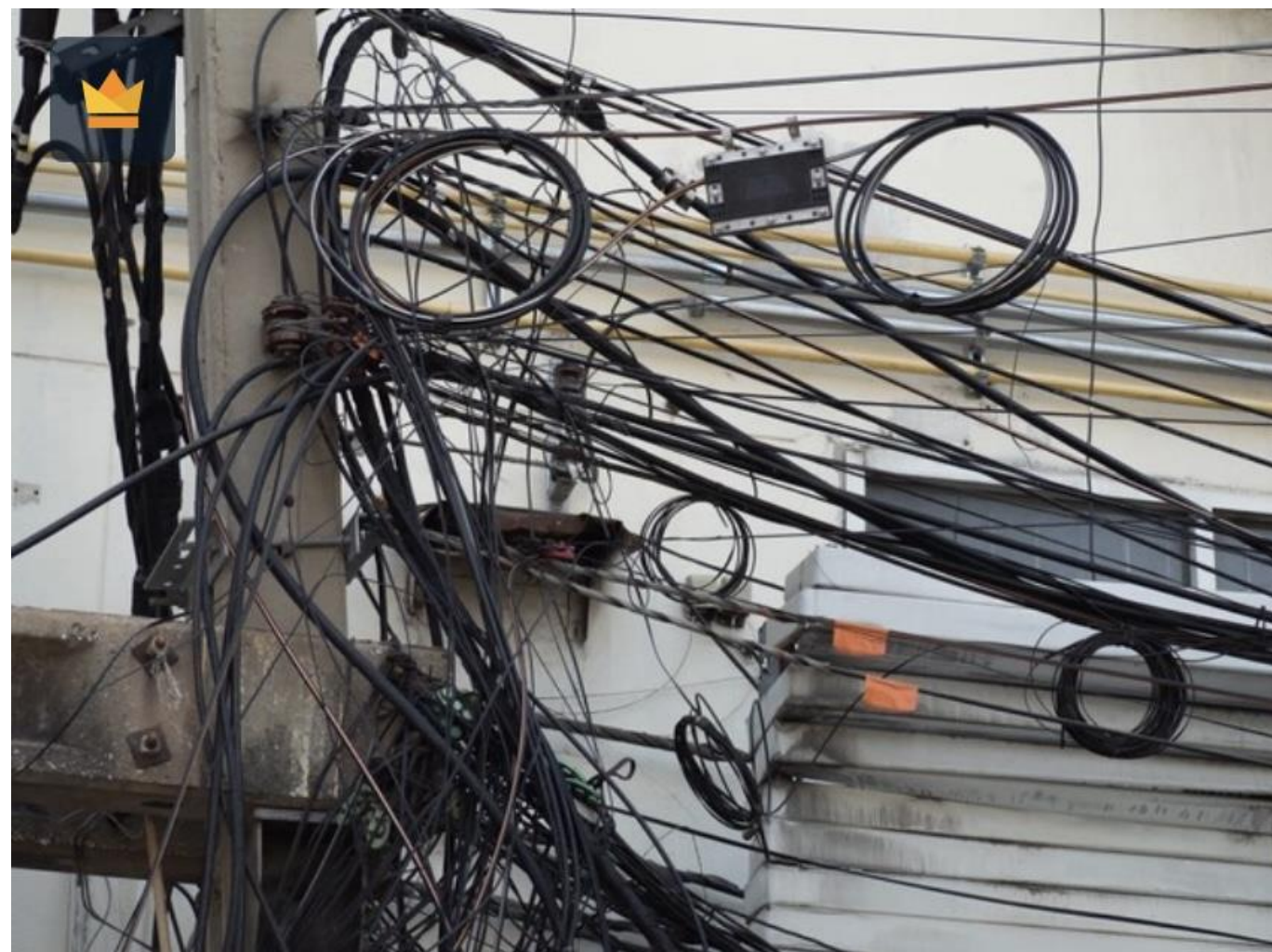
Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS



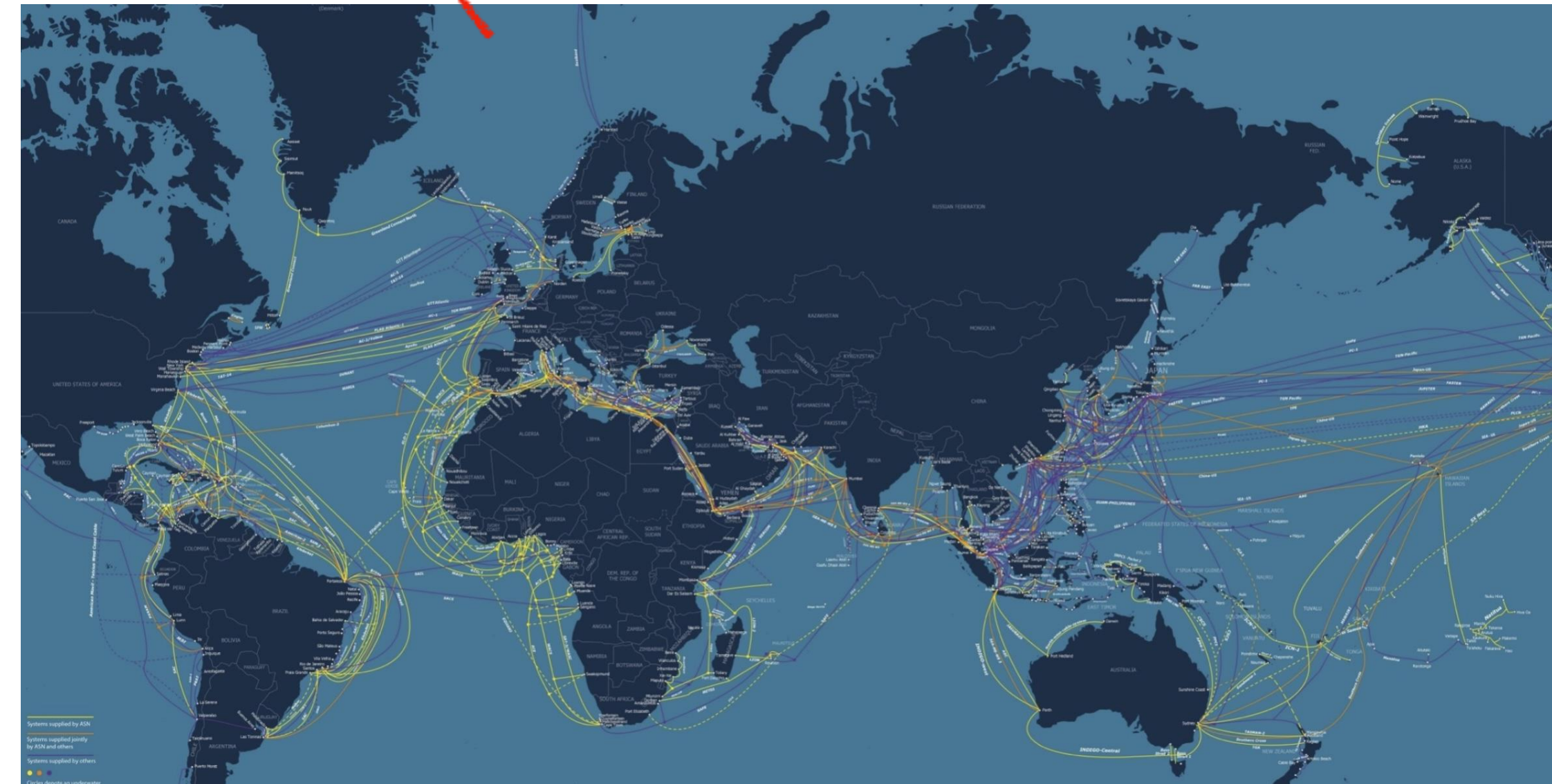
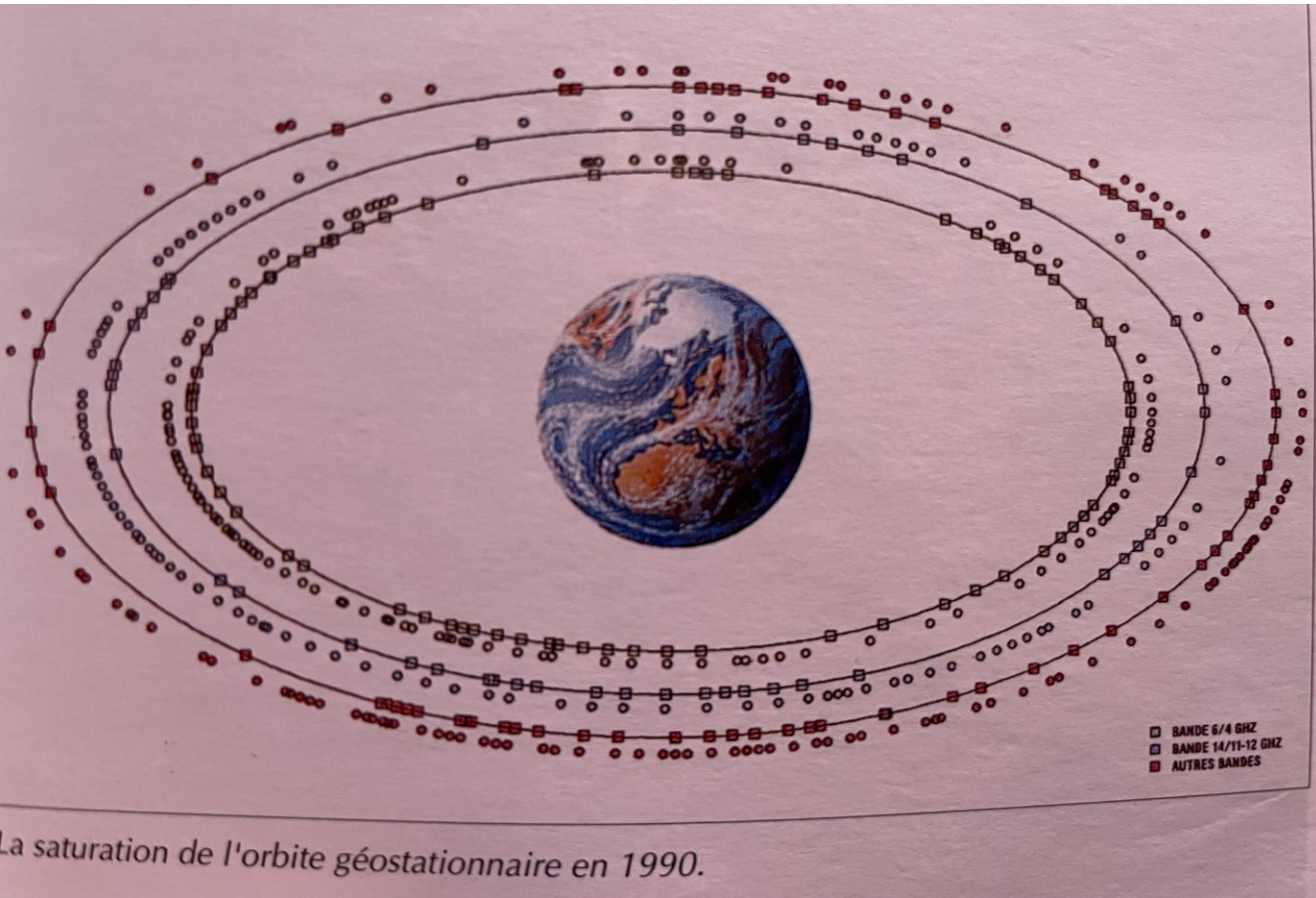
- Mais comment communique-t-on dans le monde maintenant ?
- Aujourd'hui , quand on appelle sa famille ou son voisin avec son Mobile (ou son fixe Digital) , quand on surfe sur Internet , quand on envoie un SMS ou un Mail , quand on fait un « Apéro-visio » avec des amis , quand on déclare ses impôts , quand on recherche une informations sur Google , quand on regarde la Télévision par câble via sa Box , quand on charge de la musique , quand on échange ses photos , quand on « Télé-travaille » tout le monde pense que ces communications passent par les satellites qui nous survolent

Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- Et bien NON , ou très rarement !
- Après leur parcours « hertzien» 3G/4G ... 5G ... jusqu'à l'antenne la plus proche , 99% des communications passent par des câbles terrestres ou sous-marins qui relient tous les continents.
- Seulement **1 %** des communications passent par les satellites , et encore , le plus souvent après un parcours via un câble .
- Alors comment « ça marche » tout ça ?

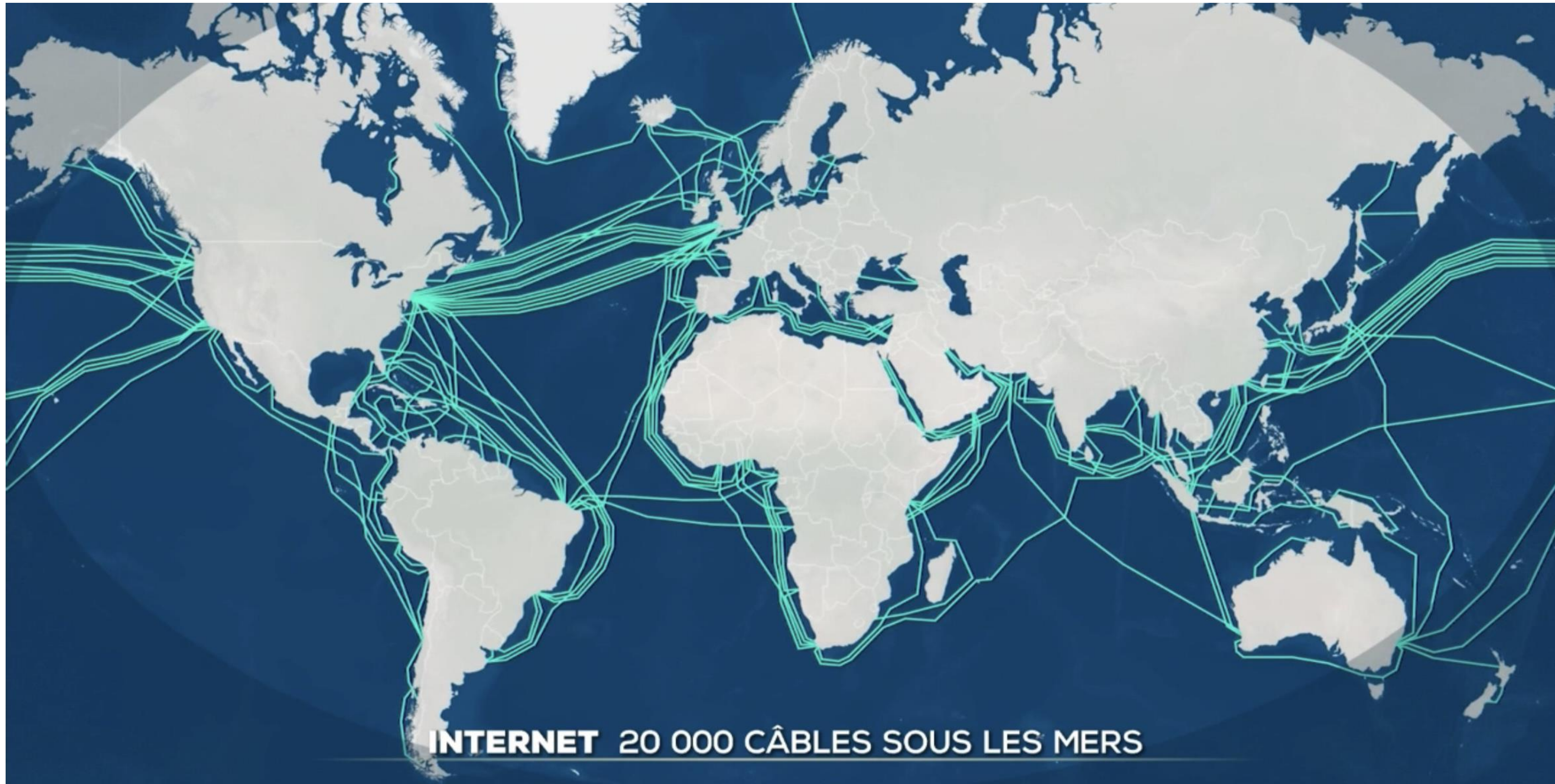


Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS



Allo ! J'entends rien , faut qu'j'aïlle au fond du jardin . Fait Ch... !!!

Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

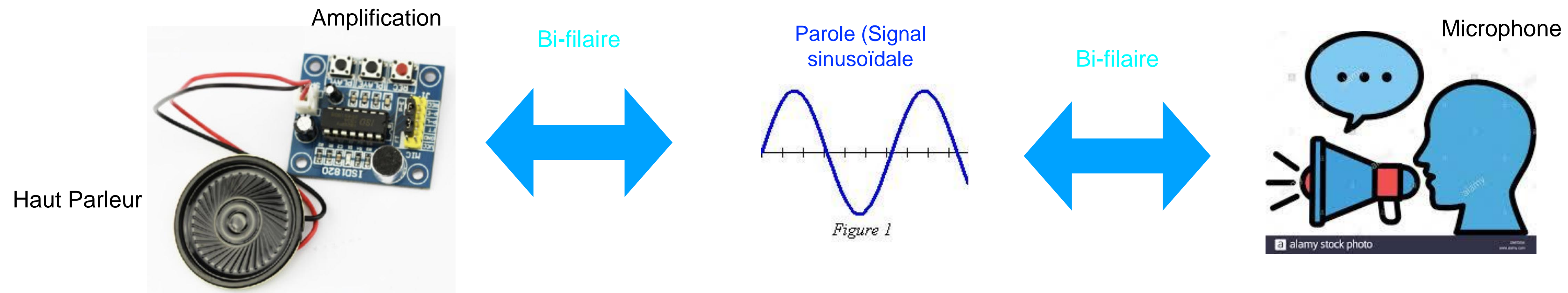


Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

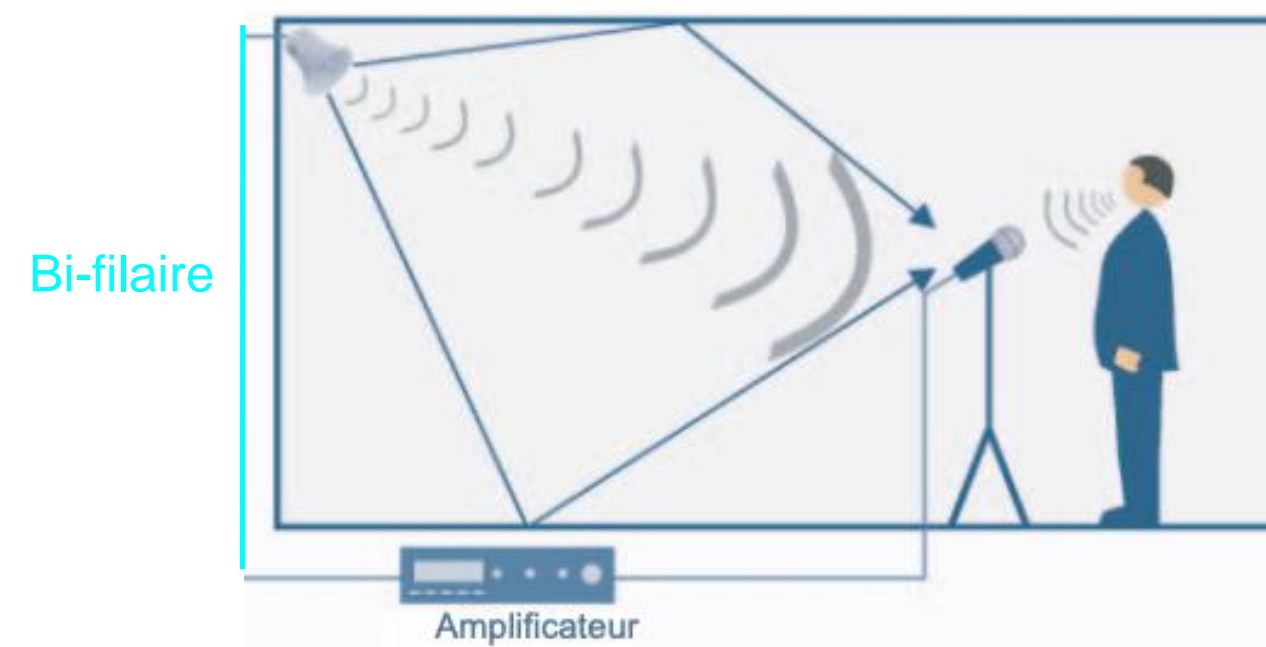
- Une grande partie de la Communication humaine se fait par le son/la voix humaine , qui est un mélange complexe de signaux sinusoïdaux se transmettant dans l'air :
 - L'oreille humaine entend et interprète bien les sons dans un spectre BF (Basse Fréquence) compris pour la plupart des gens entre 300 et 3400 Hz , même si certains sont capables d'entendre des fréquences entre 2 et 60000 Hz .
 - Alors un peu de technique et d'Histoire :
 - A l'origine des Télécommunications , Antonio Meucci (*) invente le téléphone en 1874 , et Thomas Edison avec Alexander Graham Bell vont l' « industrialiser » (1876-1892) ... et empocher les bénéfices .
 - * réellement inventé pas le Français Charles Bourseul , télégraphiste , en 1854 , mais il n'a jamais été pris au sérieux par sa hiérarchie au PTT , ni par la Faculté des Sciences en France en 1850 nos dirigeants étaient déjà de grands visionnaires ...

Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- La voix humaine (le son est déjà une onde sinusoïdale se propageant en faisant vibrer l'air) est convertie (par un micro) en signaux électriques analogiques, sinusoïdaux, correspondant directement aux fréquences de la voix, et transite sur une paire de fils. A l'autre extrémité, il suffit de retranscrire le signal électrique en son, via un haut-parleur.

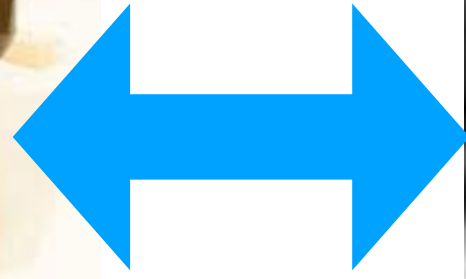


- Très vite, on s'est aperçu que la portée d'un tel signal était faible (résistance électrique du câble affaiblissant le signal) et nécessitait une paire de fils (**Bi-filaire**) par « interlocuteur abonné », donc beaucoup de « ficelles » et d'éléments d'interconnexions entre ces différents abonnés.



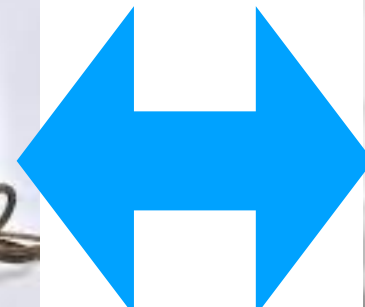
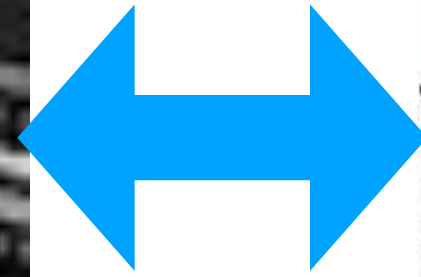
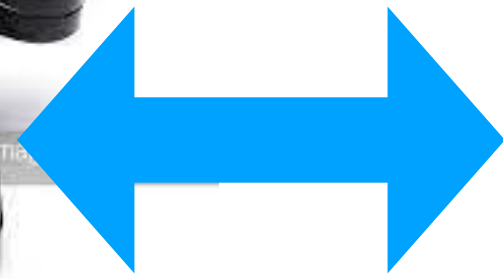
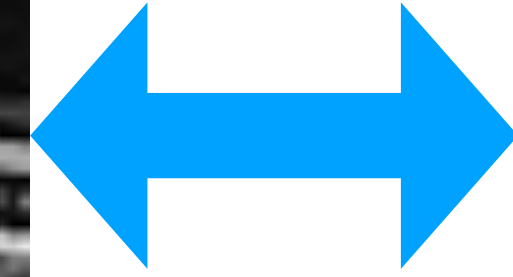
Bi-filaire

Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

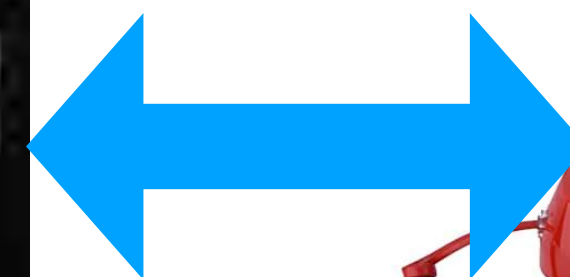


• (... OUI, serte , mais ça discute ...)

Chez Santu !



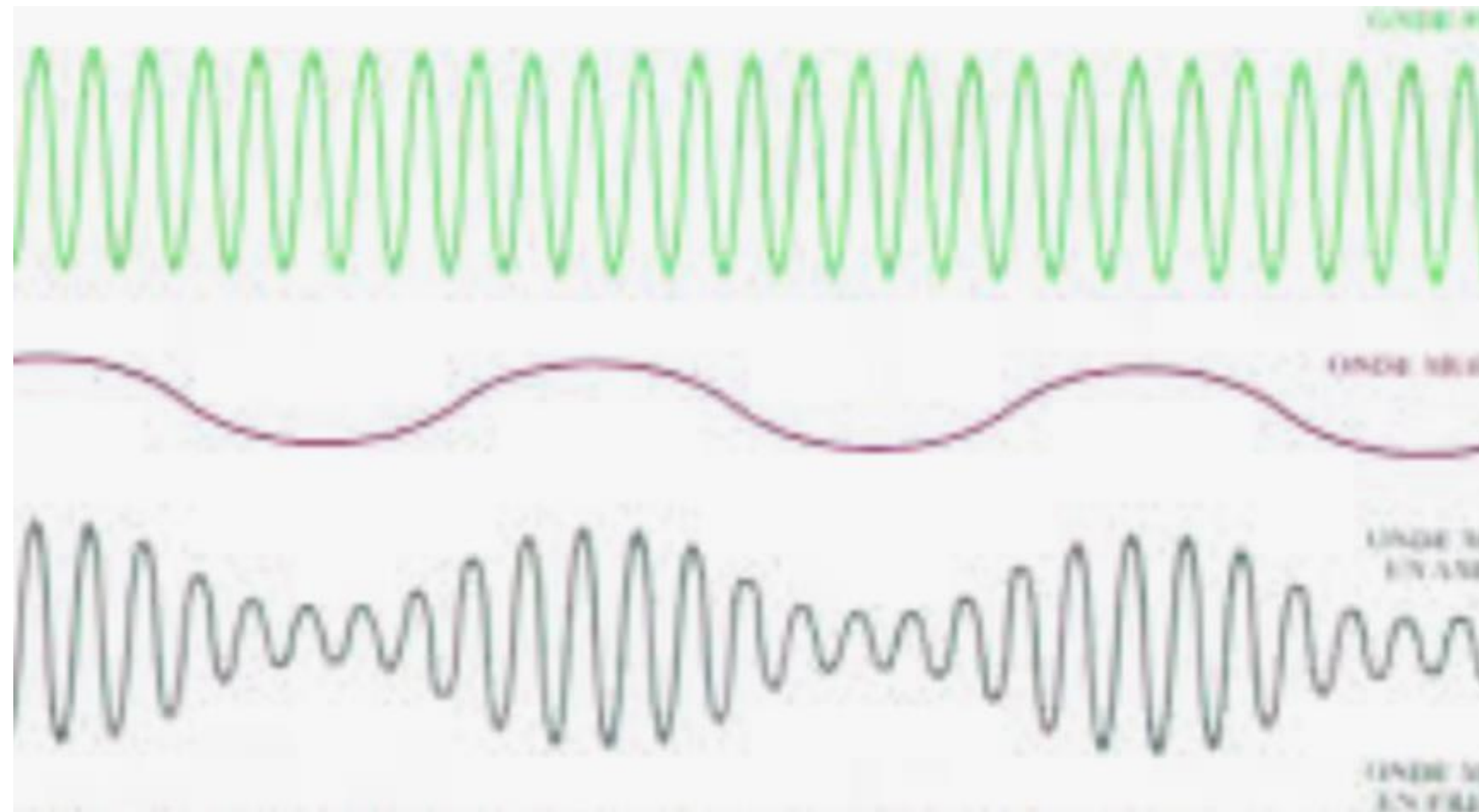
Kremlin <->
Maison Blanche



Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- Pour augmenter cette portée , et faciliter l'interconnexion , on a eu l'idée de moduler un signal (**porteuse**) HF (Haute Fréquence) par **les signaux BF de la parole** . La porteuse est transmise sur un câble coaxial en cuivre . La HF a également comme avantage de transiter par le cœur en cuivre du câble , et aussi en périphérie , et donc de ne pas subir entièrement la loi d'ohm ($U=RI \dots$) . De plus , cela permet de transporter sur la porteuse HF (donc sur un seul câble) plusieurs signaux BF , donc plusieurs abonnés .

- **Porteuse HF**
- **Parole BF à transmettre**
- **Porteuse modulée transmise sur le Câble**



Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- Cependant , les pertes dans le câble restent importantes , le signal HF transmis doit être régénéré et ré-amplifié souvent , (rôle des Répéteurs Amplificateurs nécessaires tous les km) , les phénomènes physiques limitent la montée en fréquence , (donc la capacité à transmettre de nombreux signaux) , et la portée .
- Les signaux analogiques sont difficiles à traiter et se confondent avec le bruit (agitation des atomes) causé par les matériaux et la transmission , tout au long du câble , mais aussi par les Amplificateurs .
- La limite de cette technologie est atteinte dans les années 1980 , par le « 60 MHz » , qui transportait alors 60 Voies d' abonnés sur un même câble .
- Il fallait trouver une meilleure solution ...
- Nous passerons donc de l'Analogique (signal sinusoïdale) au Numérique (le signal devient une suite de 0 et de 1) .

Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

Trois étapes pour transformer l'onde acoustique en onde radio



1 La voix est captée en un signal analogique...

Le micro transforme l'onde acoustique en un signal électrique analogique. Il est caractérisé par une infinité de fréquences et d'amplitudes.

2 ... qui est converti en un signal numérique...

Ce signal est échantillonné toutes les 125 microsecondes et quantifié sur une échelle de 256 niveaux. Chaque point est codé sur 8 bits (de valeur 0 ou 1).

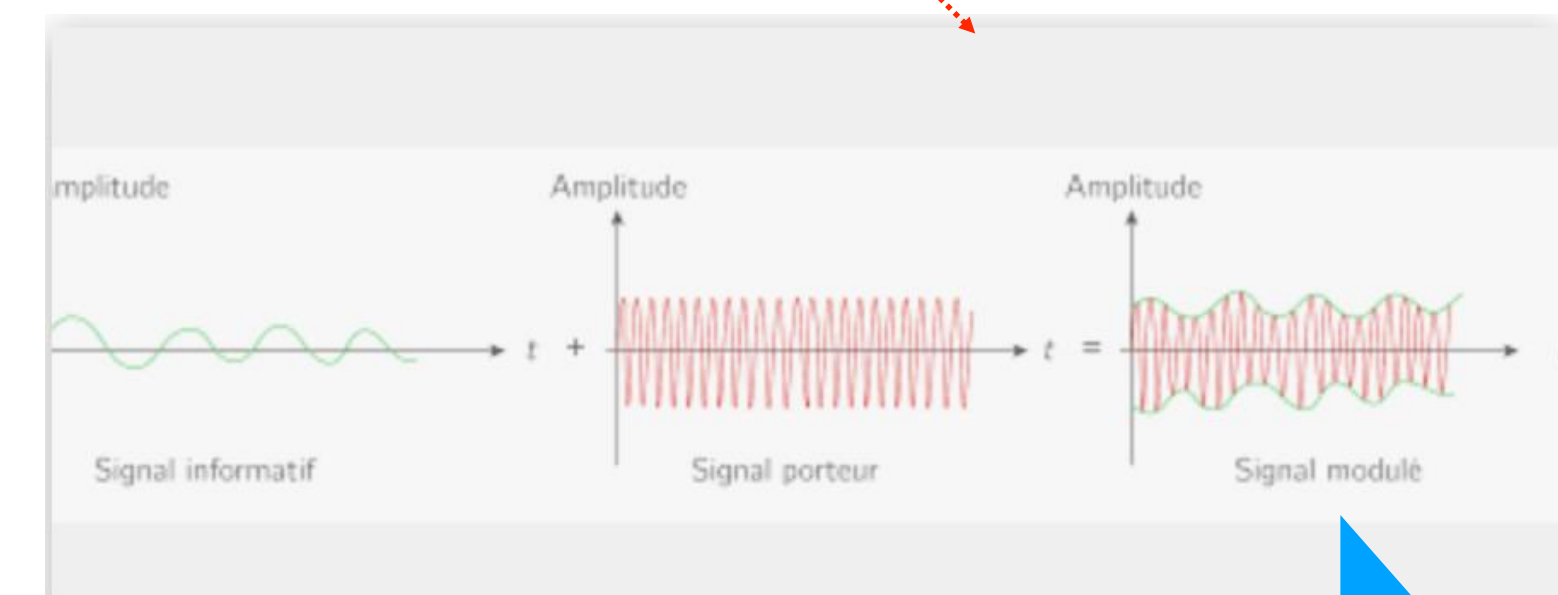
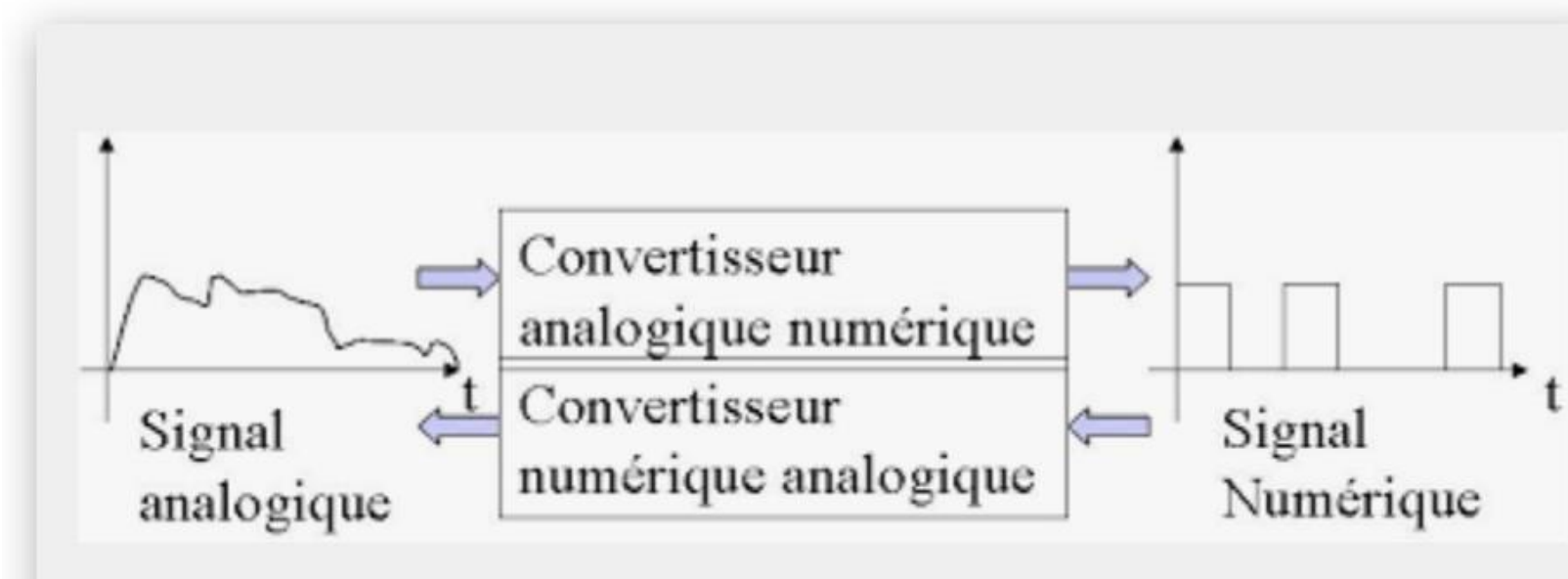
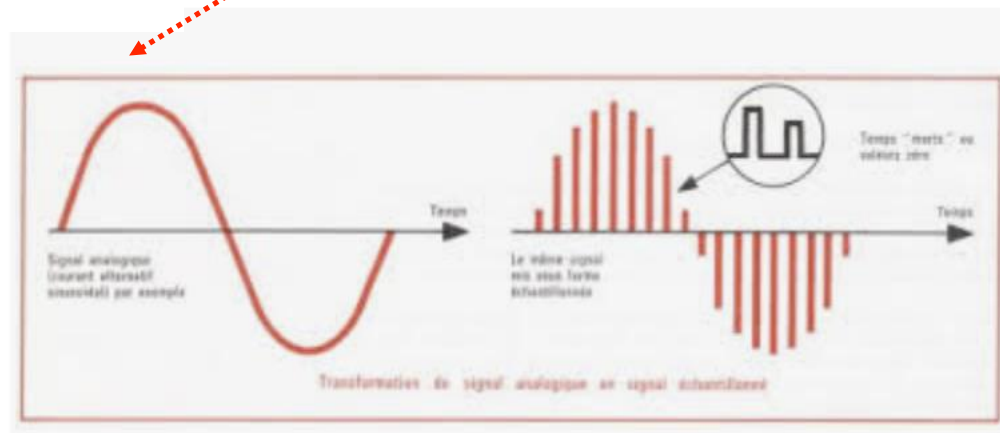
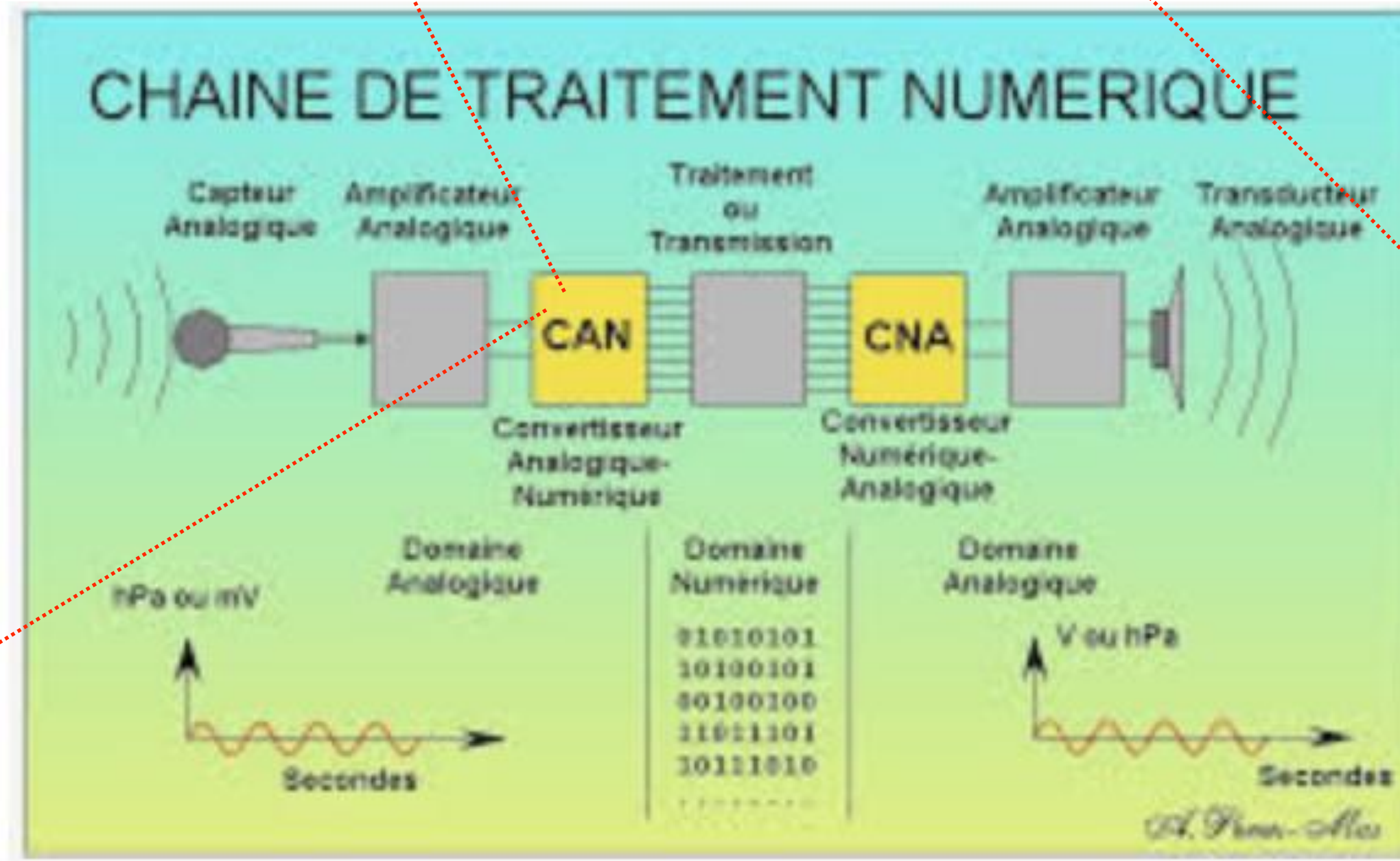
3 ... émis sous forme d'onde radio

Cette succession de 0 et 1 est transposée sur une onde électromagnétique (de fréquence 2,4 GHz pour la 4G), et émise par l'antenne du téléphone.

4 Et vice-versa lors de la réception

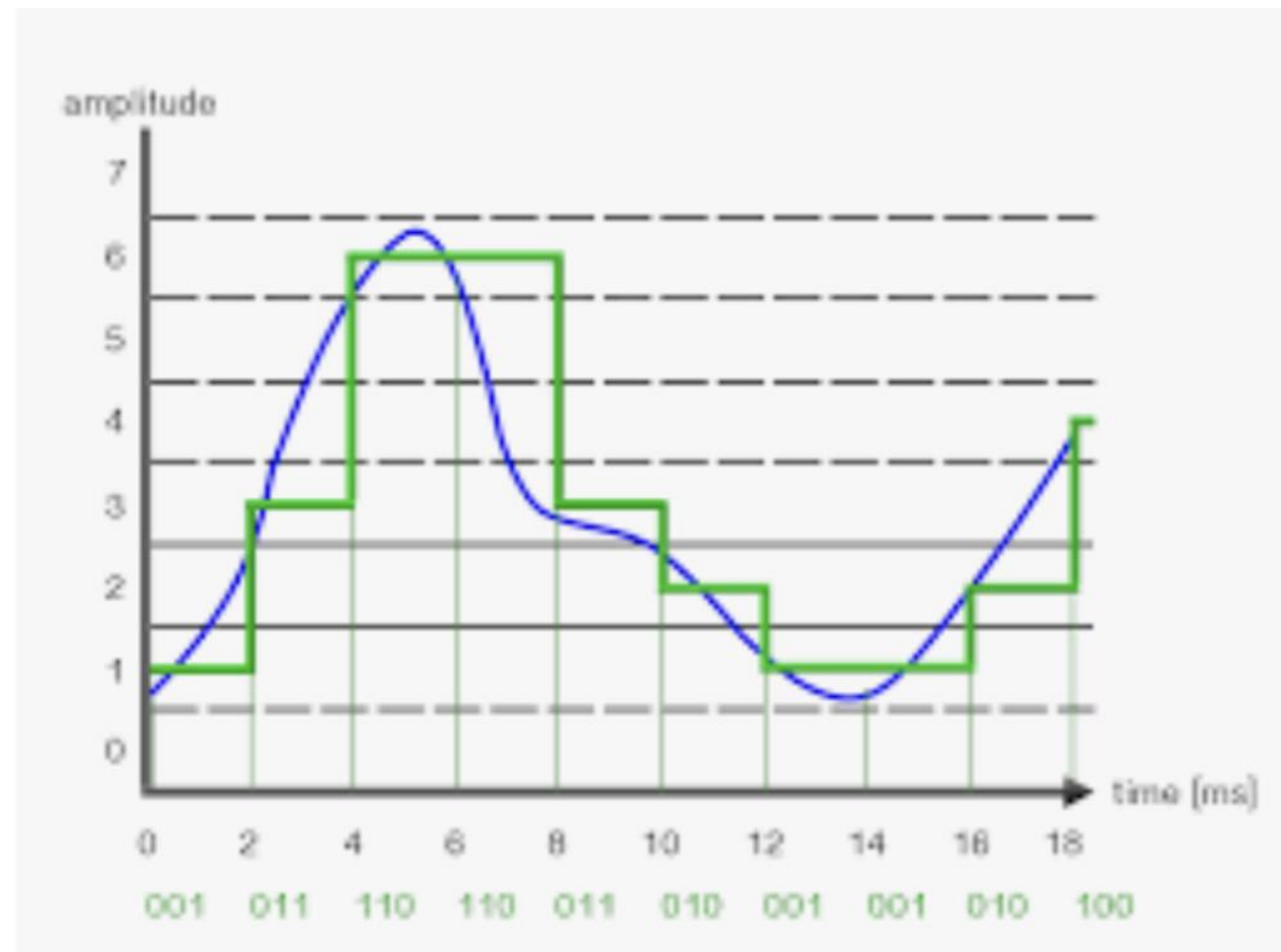
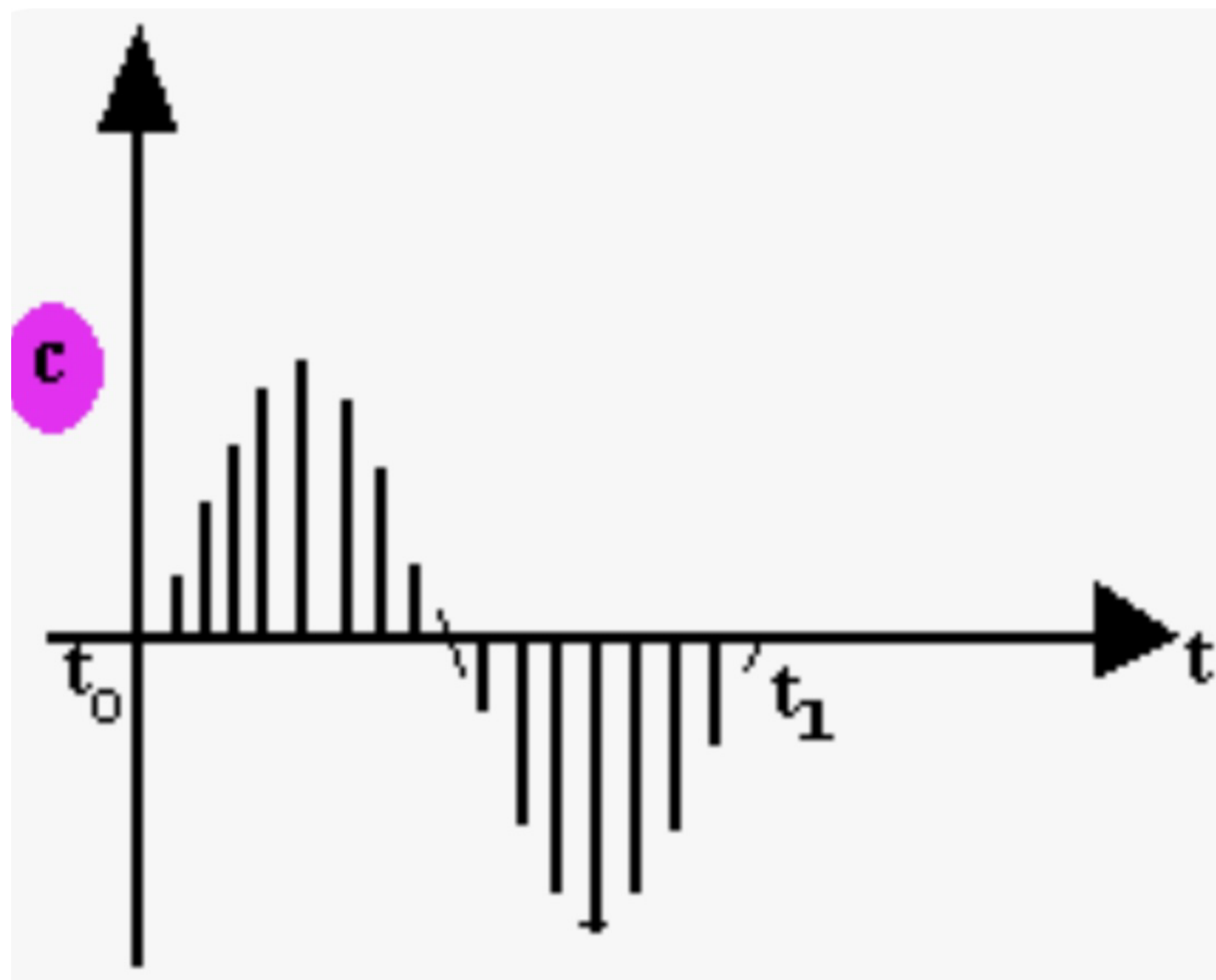
Le signal numérique est reconverti en signal analogique, *in fine* transmis par une onde acoustique par le haut-parleur.

Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS



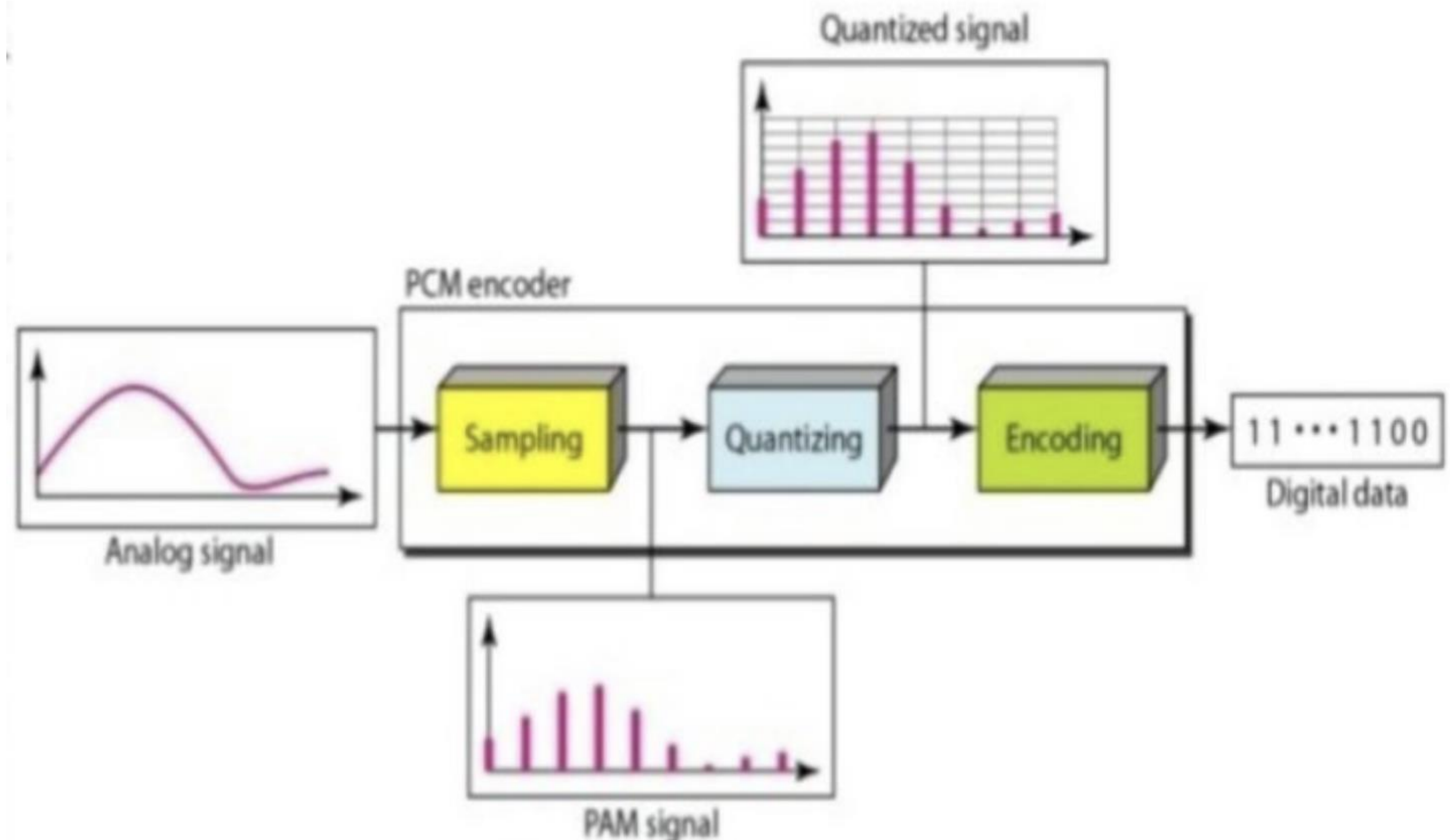
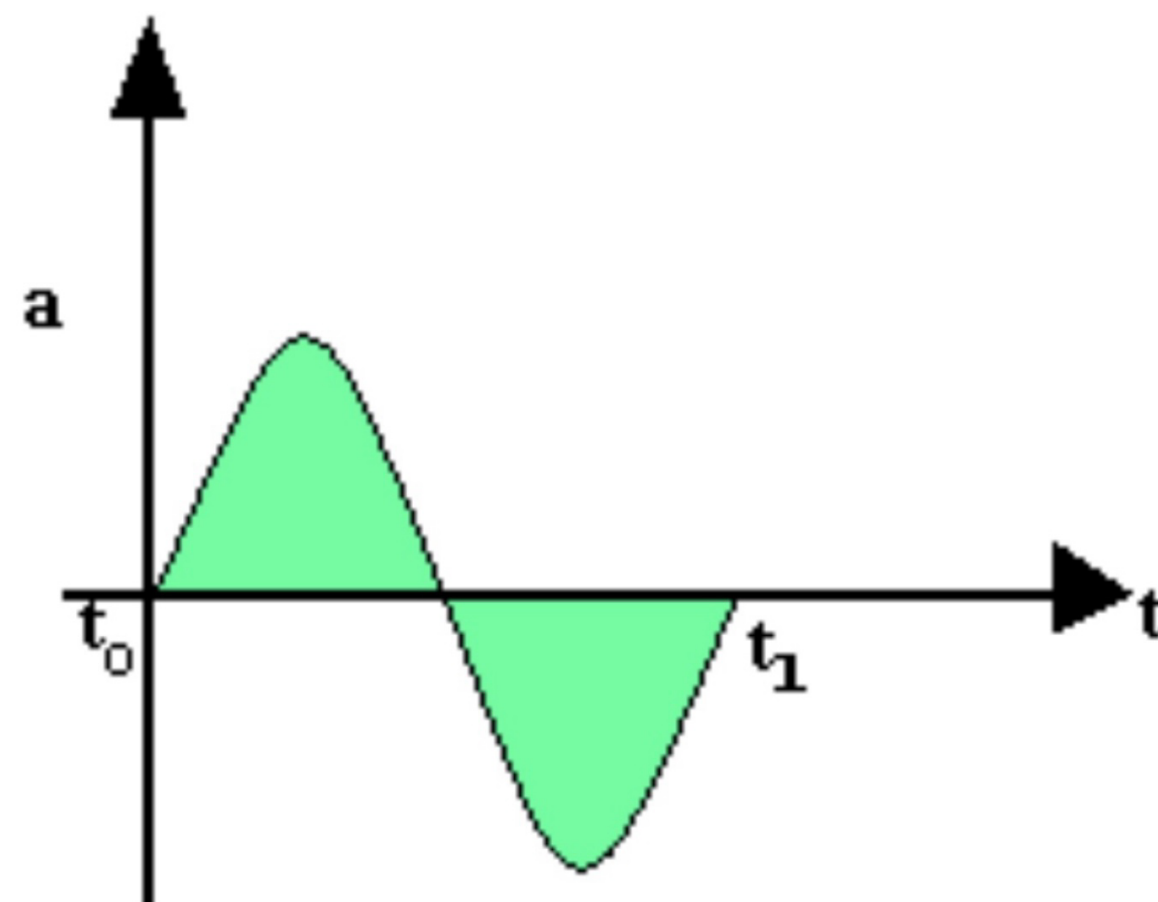
Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- Première action : coder la parole (les fréquences BF) de façon à pouvoir transmettre plus et sur de plus longues distances :
 - Pour le faire on va échantillonner le signal (parole) et le coder , le transformer en valeurs électriques numériques 0 ou 1 que l'on pourra plus facilement transporter sur des câbles et identifier .



Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- Ce sera un Codage PCM (Pulse Code Modulation / ou MIC en français : Modulation par Impulsions et Codage , avec un échantillonnage/codage à **8 KHz** , quantifié sur 16 niveaux de 0 à 15 , avec une échelle en **2⁸** , soit 256 valeurs quantiques .
- Les Données (Data) créées seront ensuite «mises en série» (Multiplexées) dans une trame à 2,048 Mbits mondialement normalisée , ce qui permettra de transmettre **32 Voies** (Voie = abonné potentiel) , simultanément à 64 Kbits (**8000x8**) , dont **30 utilisables** pour les abonnés , les 2 autres réservées à l'Exploitant (**Orange** par exemple)



Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

Détails explicatifs de la Trame : *(bon je sais c'est encore plus barbant !! ... on peut sauter Diapo 25)*

ORGANISATION DE LA MULTITRAME

Organisation de la multitrame

L'IT 16 de signalisation ne comprend que 8 bits pour transmettre la signalisation de 30 voies.

On admet pour la signalisation un rythme plus lent que pour les données.

L'ensemble de la signalisation pour les 30 voies s'effectue sur 16 trames soit :

125 microsecondes x 16 = 2 millisecondes

Ces 16 trames forment la multitrame.

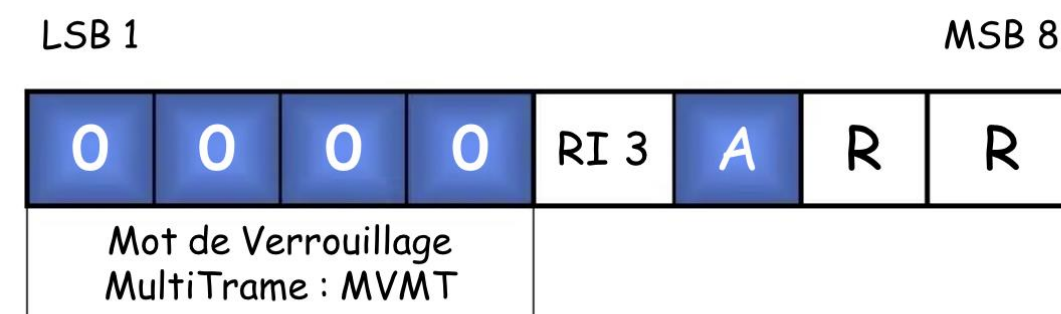
La répartition se fait de la manière suivante :

- l'IT16 de la trame "0" est le mot de Verrouillage de Multi-Trame (VMT) indispensable pour la synchronisation des signalisations à la réception
- 2 à 4 bits par IT 16 pour les trames "1 à 15"

Si l'on n'utilise que 30 bits pour la signalisation (1 bit par voie) les 30 autres bits peuvent être utilisés pour transmettre de la télégraphie.

ORGANISATION DE LA MULTITRAME (suite)

IT 16 de la trame "0"



Les bits n°1 à 4 forment le mot de Verrouillage Multi-Trame (VMT)

Le bit n°5, Réserve Internationale n°3

Le bit n°6 est utilisé pour l'alarme en cas de perte de VMT : "0" pas d'alarme

Les bits n° 7 et 8 sont en réserve

ORGANISATION DE LA TRAME (suite)

L'IT0 possède 2 configurations particulières suivant que la trame est paire ou impaire

IT0 de des trames paires (0 , 2 , 4 ...)



Le bit n°1 (RI1) est la Réserve Internationale n°1, il est mis à "1" si la réserve n'est pas utilisée.

Les bits n°2 à 8 forment le mot de Verrouillage de Trame (VT)

ORGANISATION DE LA TRAME (suite)

L'IT0 possède 2 configurations particulières suivant que la trame est paire ou impaire

IT0 de des trames impaires (1 , 3 , 5 ...)



Le bit n°1 (RI2), Réserve Internationale 2, est à "1" si réserve non utilisée.

Les bits n°2 et 6 sont fixés à "1" pour éviter toute ressemblance avec le mot VT.

Le bit n°3 est utilisé pour l'alarme en cas de perte de VT : "0" pas d'alarme.

Le bit n°4 est utilisé pour l'alarme taux d'erreur : "0" = erreur < 10⁻³

Les bits (RN), Réserve Nationale sont à "1" si réserve non utilisée.

ORGANISATION DE LA MULTITRAME (suite)

IT 16 de la trame "n"



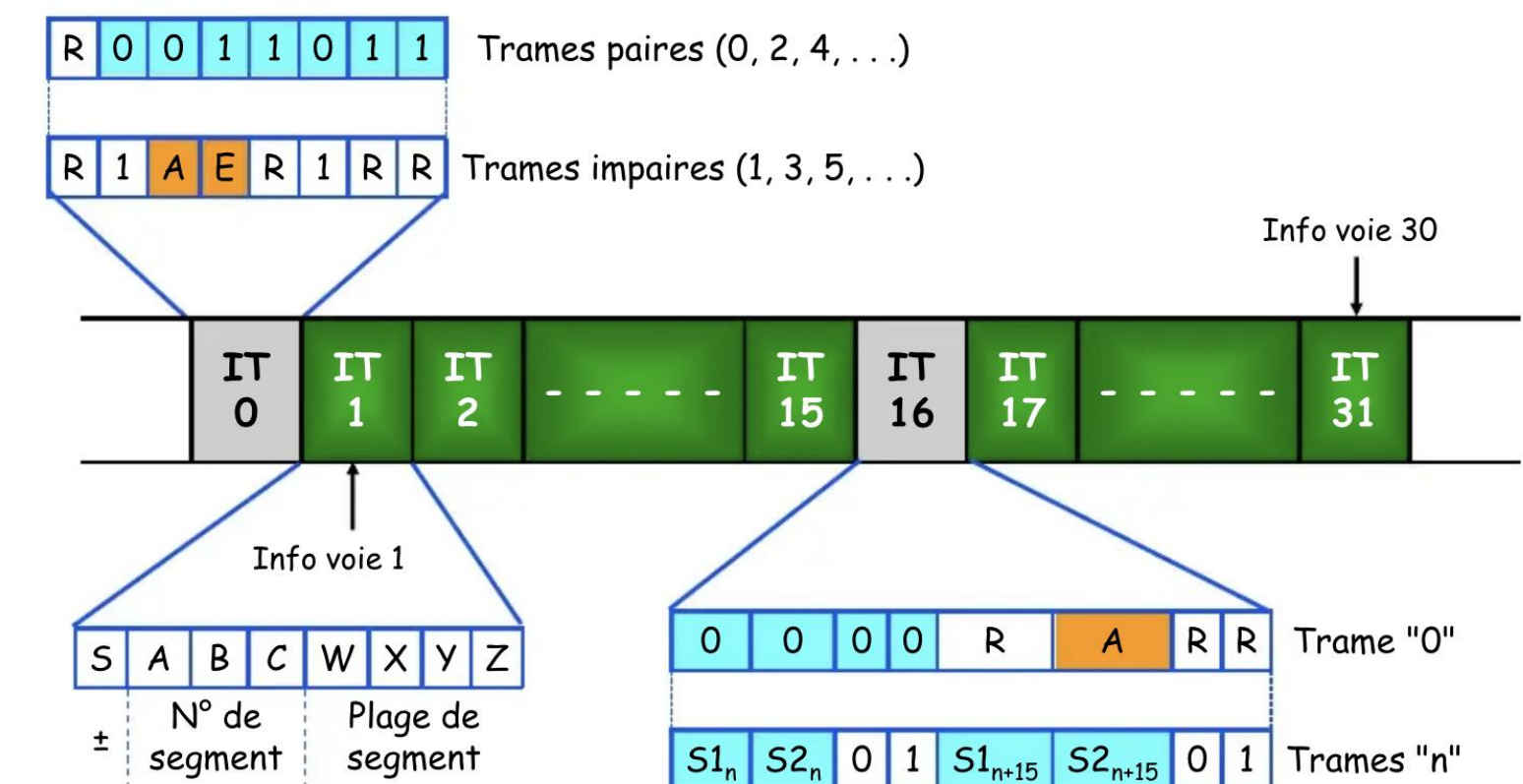
Les bits n°1 et 2 forment la signalisation de la voie n (1 ou 2 bits)

Le bit n°4 est fixé à "1" pour éviter toute ressemblance avec le VMT

Les bits n°5 et 6 forment la signalisation de la voie m = n+15

Les bits n° 7 et 8 sont en réserve (fixés respectivement à "0" et "1")

ORGANISATION DE LA MULTITRAME (suite)



Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

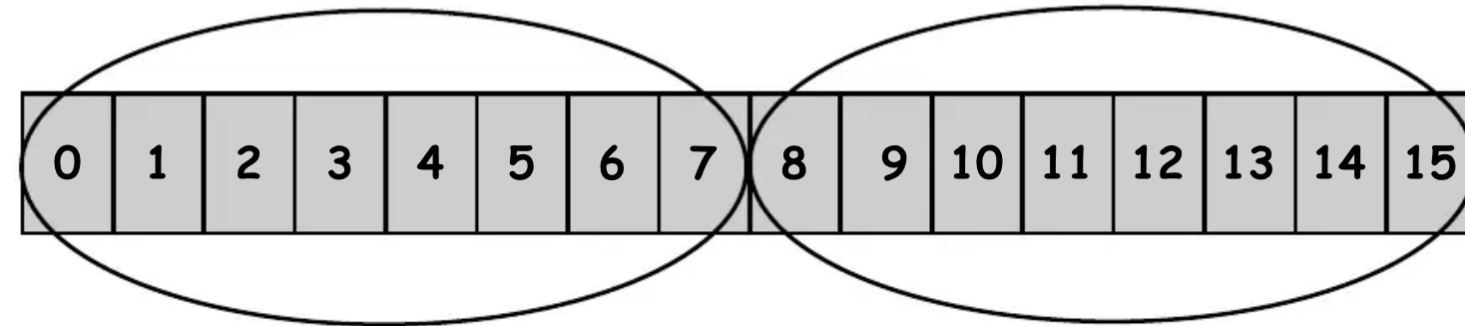
Détails explicatifs de la Trame : *(bon je sais c'est encore plus barbant !! ... on peut sauter Diapo 25)*

ORGANISATION DE LA MULTITRAME (suite)

Code correcteur d'erreur : CRC4

SMT n

SMT n+1

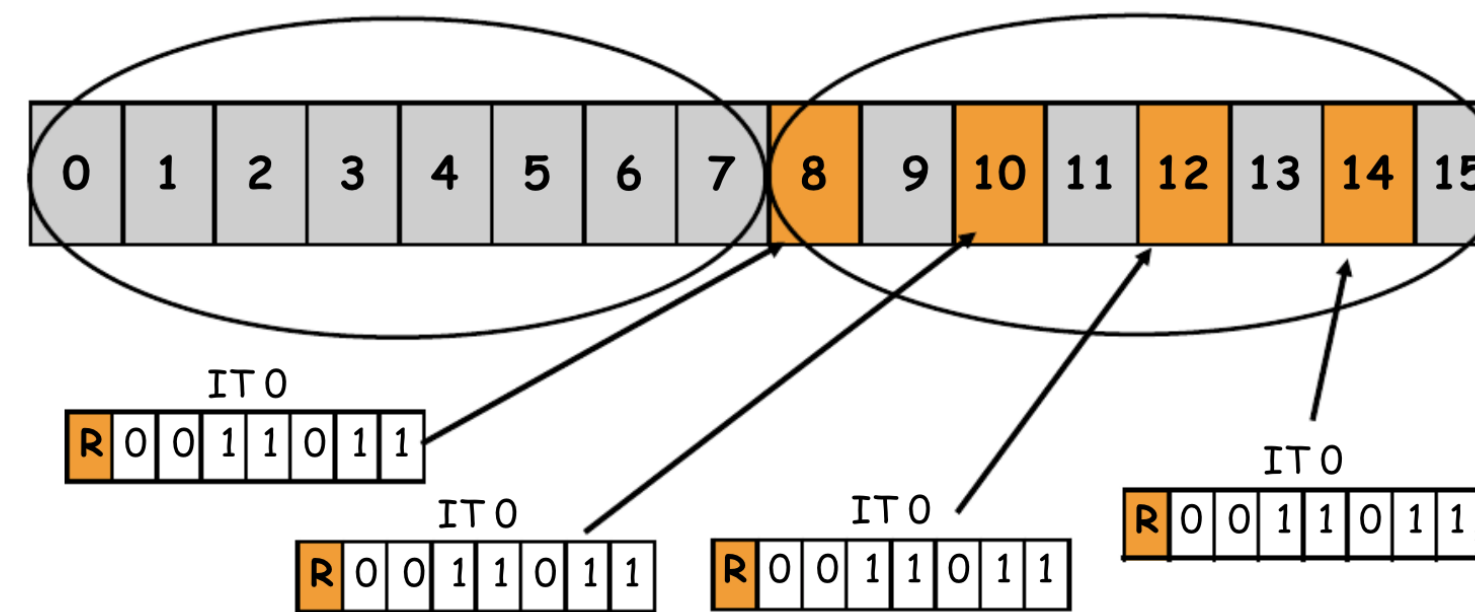


ORGANISATION DE LA MULTITRAME (suite)

Code correcteur d'erreur : CRC4

SMT n

SMT n+1



ORGANISATION DE LA MULTITRAME (suite)

Code correcteur d'erreur : CRC4

Soit $F(x)$ la fonction polynomiale de la SMT "n"

Soit $G(x) = X^4 + X + 1$

Le CRC 4 est le reste de la division polynomiale $F(x) / G(x)$

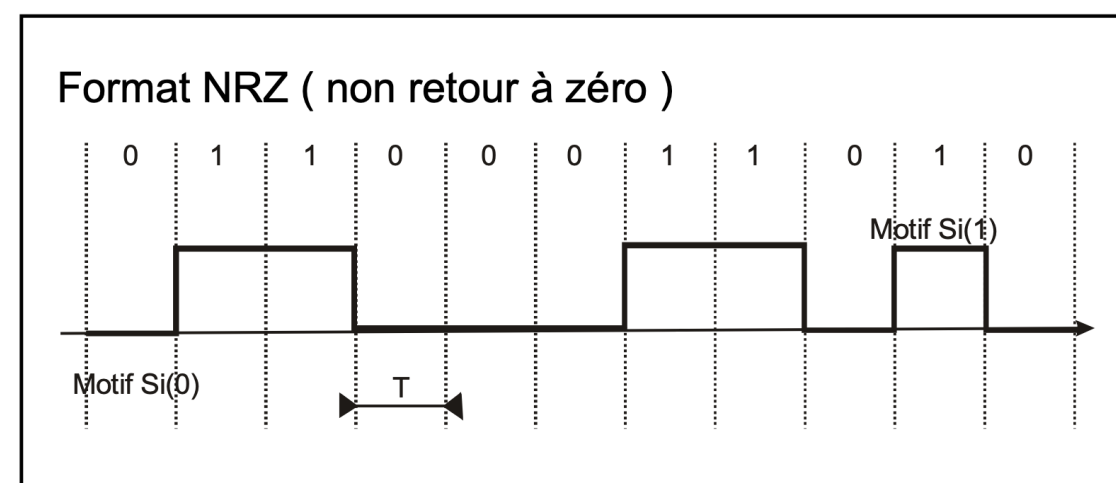
Il est inséré dans la SMT "n + 1"

Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

Détails explicatifs de la Trame : *(bon je sais c'est encore plus barbant !! ... on peut sauter Diapo 25)*

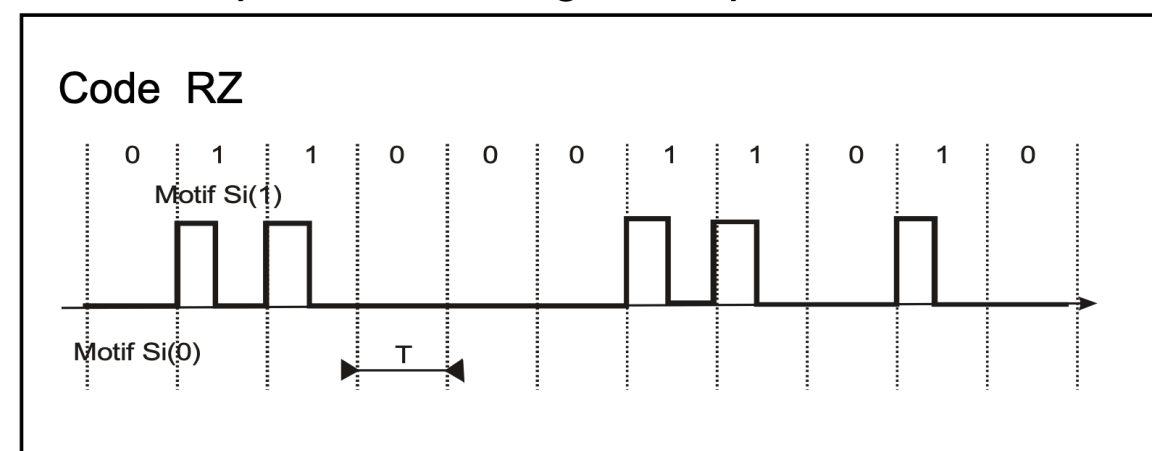
- Afin de résoudre une partie des difficultés liées aux suites de zéro à transmettre, on introduit un code permettant de s'affranchir de ce problème.
- Différents codes existent dont les plus élémentaires sont les suivants :

- Codes AMI, NRZ et RZ

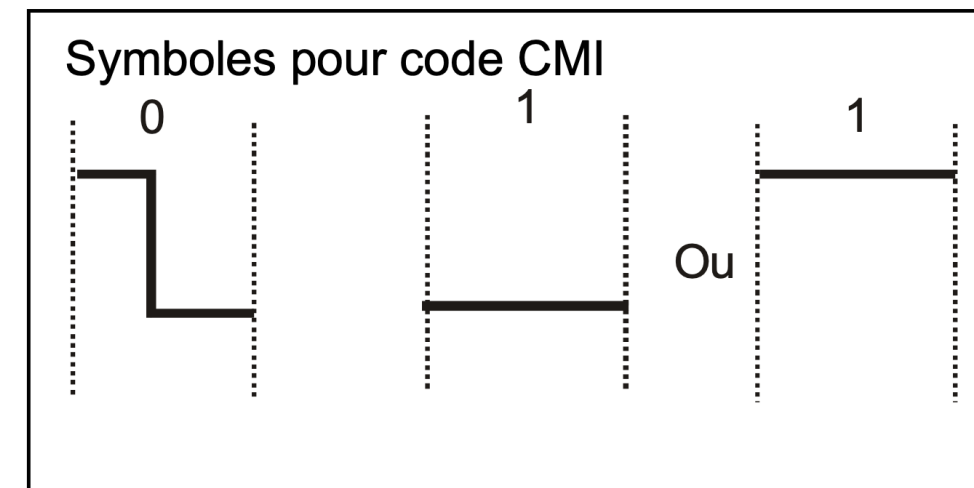


Format RZ (retour à zéro)

Le signal retourne au niveau zéro pendant une demi-période d'horloge. On peut aussi considérer



Code CMI

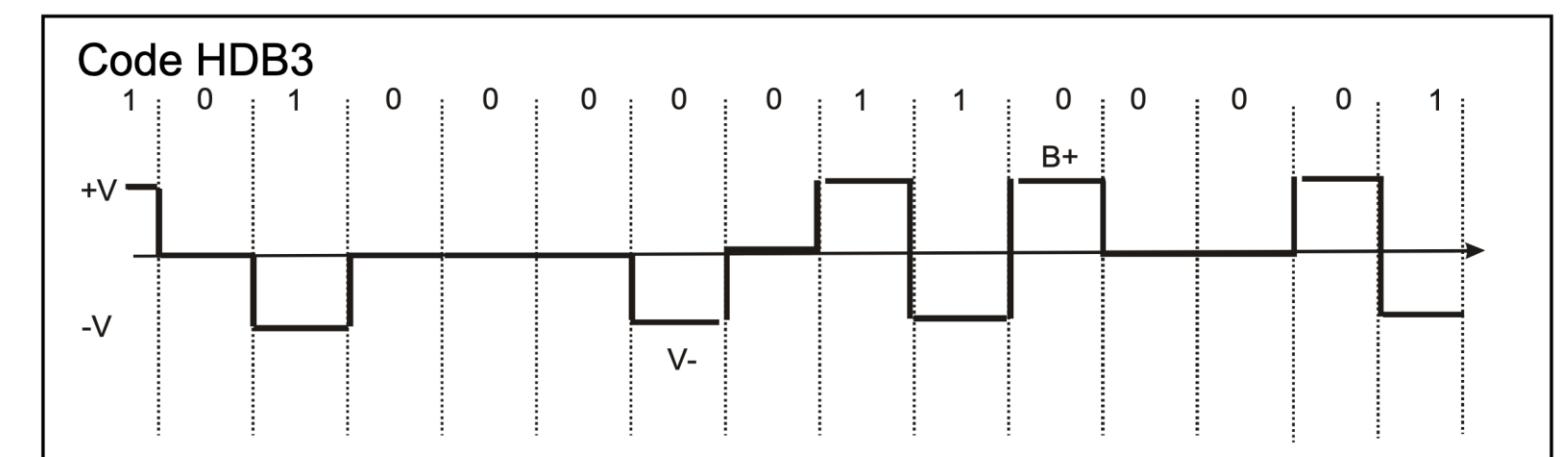


- CMI : Les 1 sont codés tour à tour par un niveau haut et par un niveau bas

Codes HDBn

Quel que soit le code utilisé la restitution de l'horloge bit peut être difficile si le nombre de transitions est insuffisant, par exemple avec un code CMI et une longue suite de 1 l'amplitude de la raie à $1/T$ devient très faible. Pour remédier à ce problème plusieurs solutions sont possibles, la première étant le code HDBn (Haute Densité Bipolaire d'ordre n)

Ce code est dérivé du code bipolaire (AMI) dans lequel on interdit plus de n symboles successifs nuls. Le (n+1) ième d'une suite est codé par un niveau $\pm V$, le signe étant choisi de façon à violer la règle d'alternance des signes. Pour éviter qu'une très longue suite de bits nuls n'introduise une moyenne globale non nulle, on impose en plus aux viols de satisfaire entre eux la règle d'alternance. Mais il se peut que dans ce cas le récepteur ne sache plus distinguer entre un symbole d'un caractère de viol. Dans ce cas le premier zéro d'une suite de n+1 zéros consécutifs est codé avec un $\pm V$ du même signe que le viol qui lui succède. C'est un bit dit de **bourrage**.

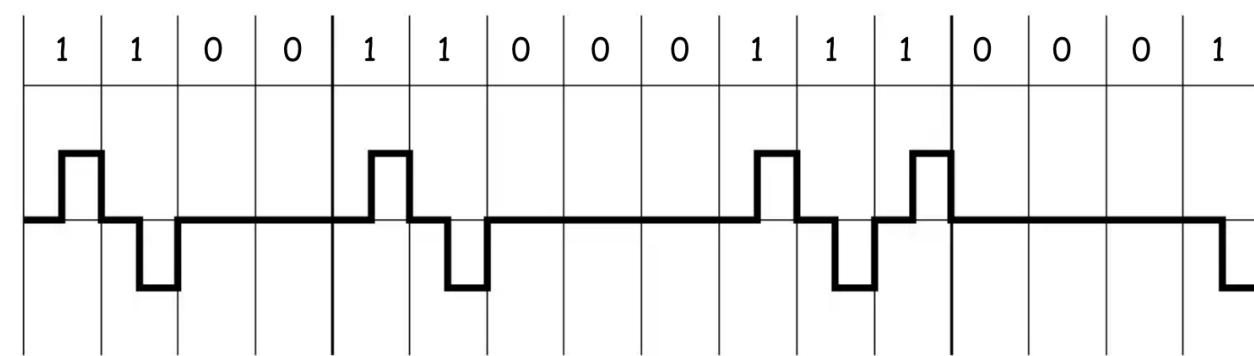


- Pour la Trame MIC, c'est le code HDB3 qui a été normalisé

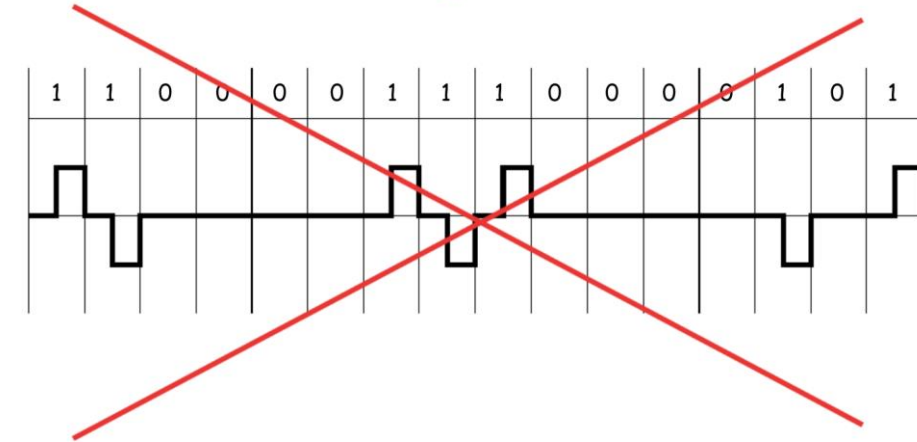
Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

Détails explicatifs Codage HDB3 : *(bon je sais c'est encore plus barbant !! ... on peut sauter Diapo 25)*

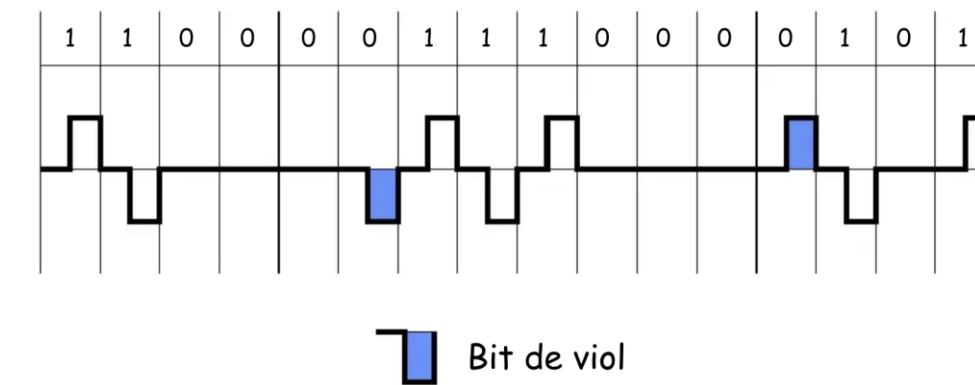
Codage HDB3



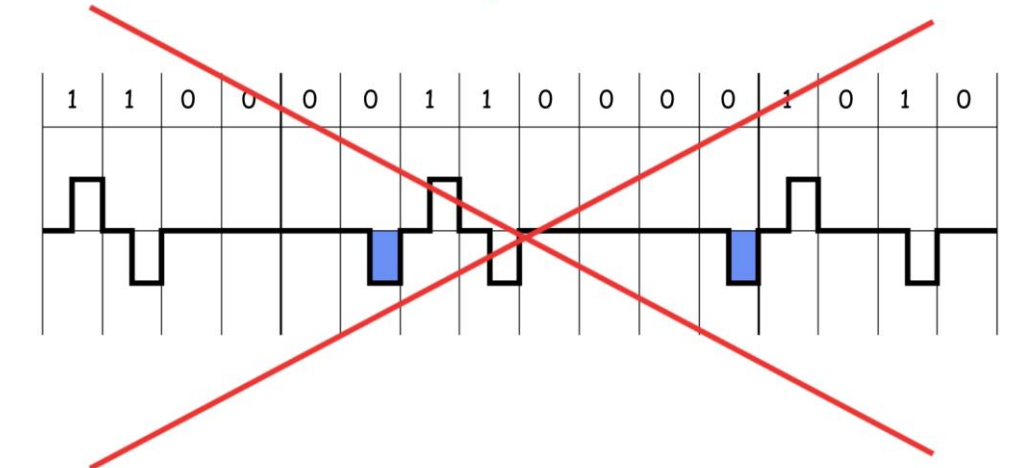
~~Codage HDB3~~



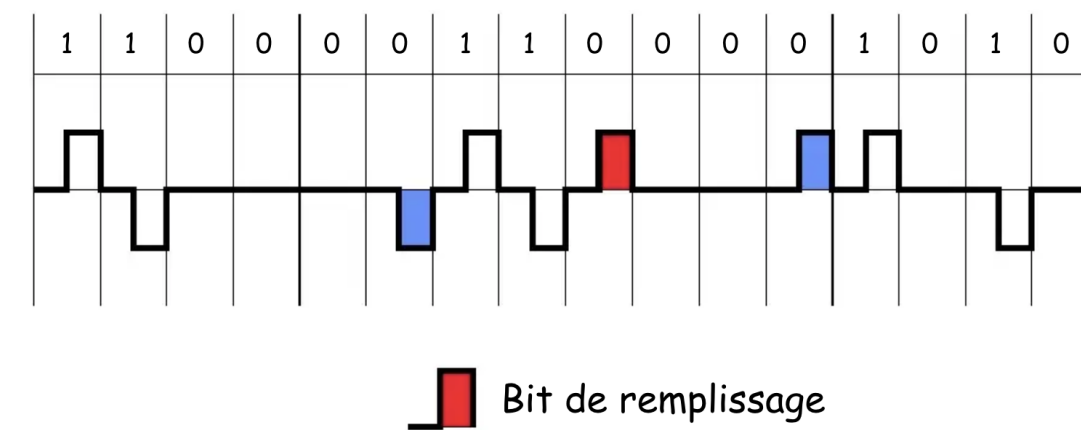
Codage HDB3



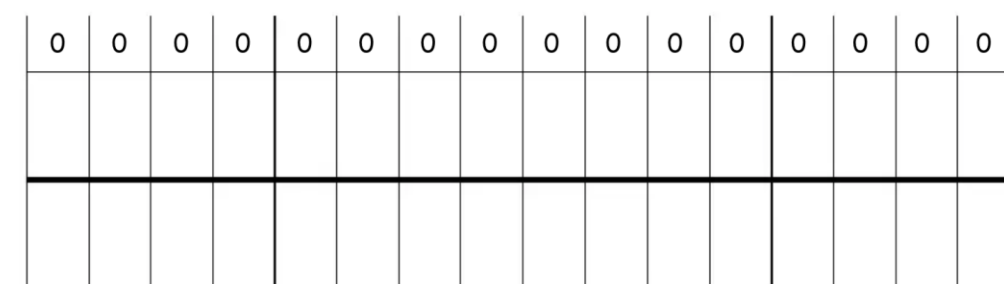
~~Codage HDB3~~



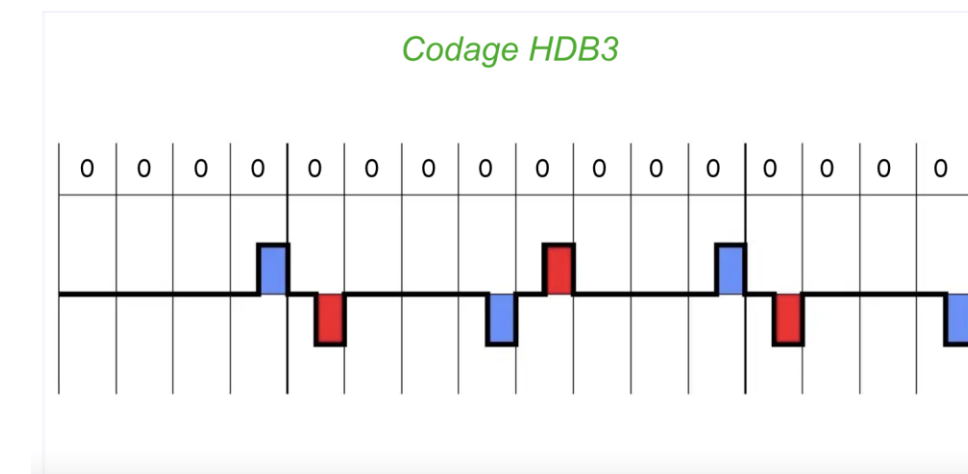
Codage HDB3



Codage HDB3



Codage HDB3



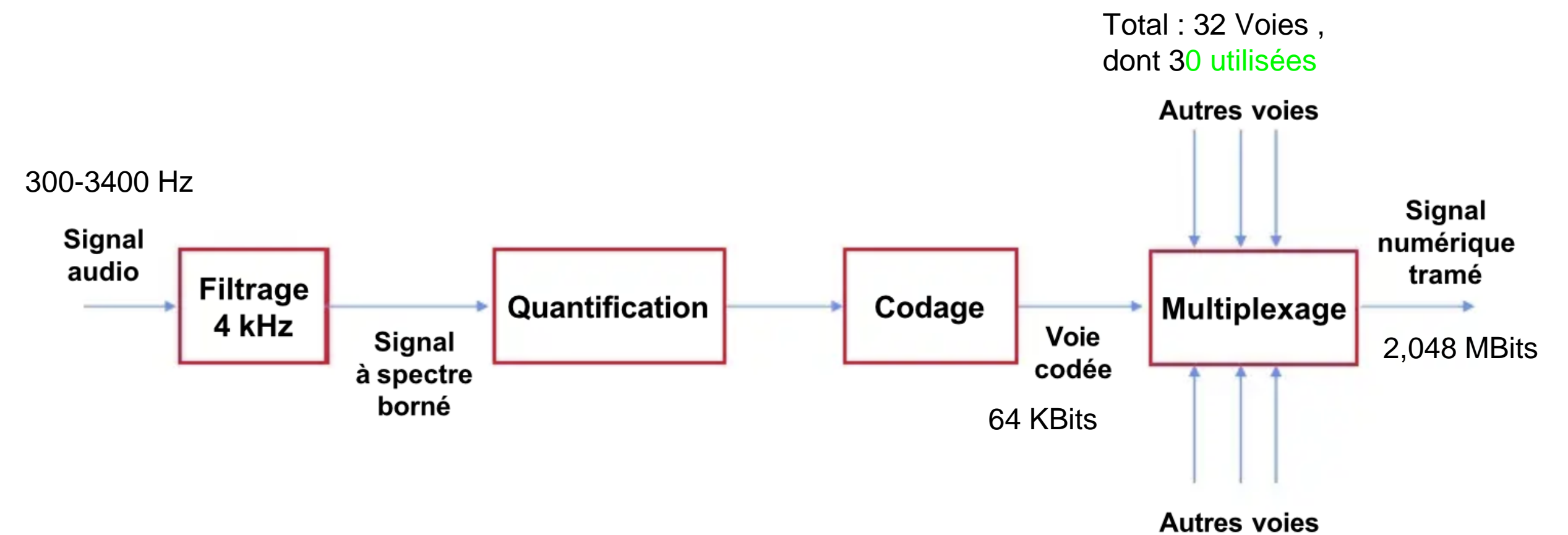
Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

RESUME de l'explicatif de la Trame :

RESUME

- La transmission numérique des 30 voies MIC s'effectue par :
 - FILTRAGE de chacune des voies pour limiter le spectre
 - ECHANTILLONNAGE de chacune des voies
 - QUANTIFICATION et CODAGE des échantillons
 - MULTIPLEXAGE temporel des échantillons codés
 - TRANSFERT du signal codé en un signal HDB3
suppression des composantes continues du signal à cause des transfos, transfert sous un seul signal des données et du rythme
- Cela nécessite une organisation en :
 - TRAME pour les voies
 - MULTITRAME pour les signalisations

TRAITEMENT D'UNE VOIE



Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- Donc l'ensemble sera transmis en Ligne sur une porteuse de fréquence beaucoup plus élevée donc permettant de transporter sur un même câble plus d'informations .
- L'évolution des différents Multiplexage est : 2Mbits (2,048/30 Voies) -> 8 MBits -> 16 MBits -> 32 MBits (34,368/480 Voies) -> 64 MBits , et dans les Terminaux de Ligne (SLTE) , puis 140 MBits (139,264/1920 Voies), et 560 MBits (564,992/7680 Voies) en Ligne .
 - Les informations étant numérisées 0 ou 1 , il est plus facile de les identifier , donc on peut également augmenter les portées .
- On ne transmet plus que de la voix , mais la numérisation des signaux en 0-1 permet également de transporter des données (Data) .
- L'utilisation de codage va permettre d'augmenter encore les portées , et de corriger les erreurs de Transmission (Codage HDB3 , Correcteurs d'erreurs ...)

Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- Les informations (Voix et Data) sont transmises dans une trame (suite de 0 et de 1) organisée , verrouillée par des suites 01 bien identifiées (mot des verrouillage de Trame) .
- Comme on a déjà vu , on peut alors introduire en ligne :
 - Des bits de parité afin de couper les suites de 0 , qui perturbent la transmission .
 - des codage particuliers ([Codes Correcteurs d'erreurs / FEC : Forward Error Code](#)) , auto corrigeant les erreurs de transmission ([4B3T,12B1P1C](#)) .
- Le but est toujours d'augmenter les longueurs de transmission , le nombre d'informations transmises , mais aussi d'améliorer la fiabilité de la Transmission .

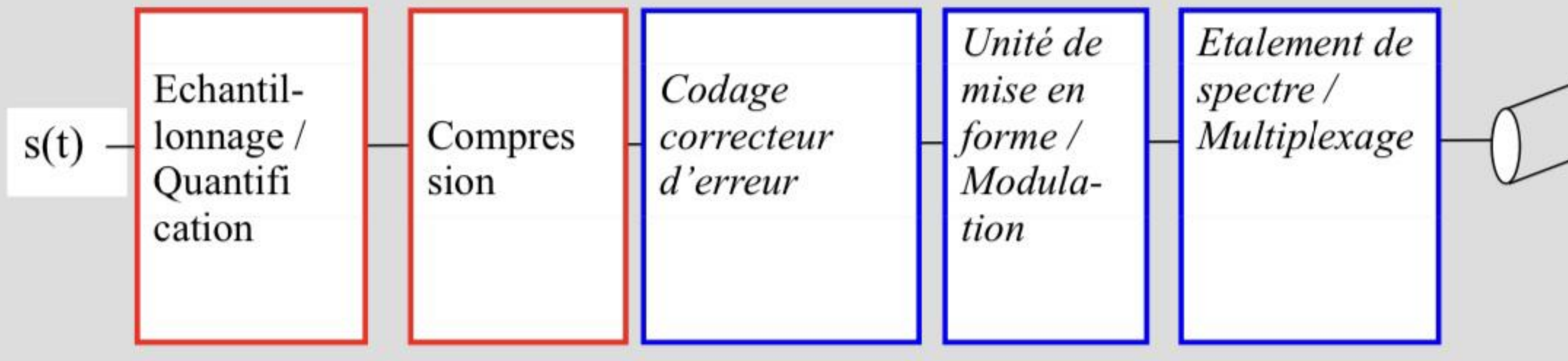
Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- L'introduction de ces codes a pour effet (**négatif ***) d'augmenter le débit en ligne :
- 2 trames de 64 Mbits multiplexées (mélangées) donnent un débit de 128 Mbits , qui sera émis en Ligne à 139,264 Mbits (140) , la différence venant des verrouillages et des bits de codage introduits .
- *** Négatif , car plus on monte en fréquence , plus la technologie est coûteuse (prix des composants électroniques) et difficile à maîtriser .**

Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- En résumé :

Synoptique d'une chaîne de transmission



Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

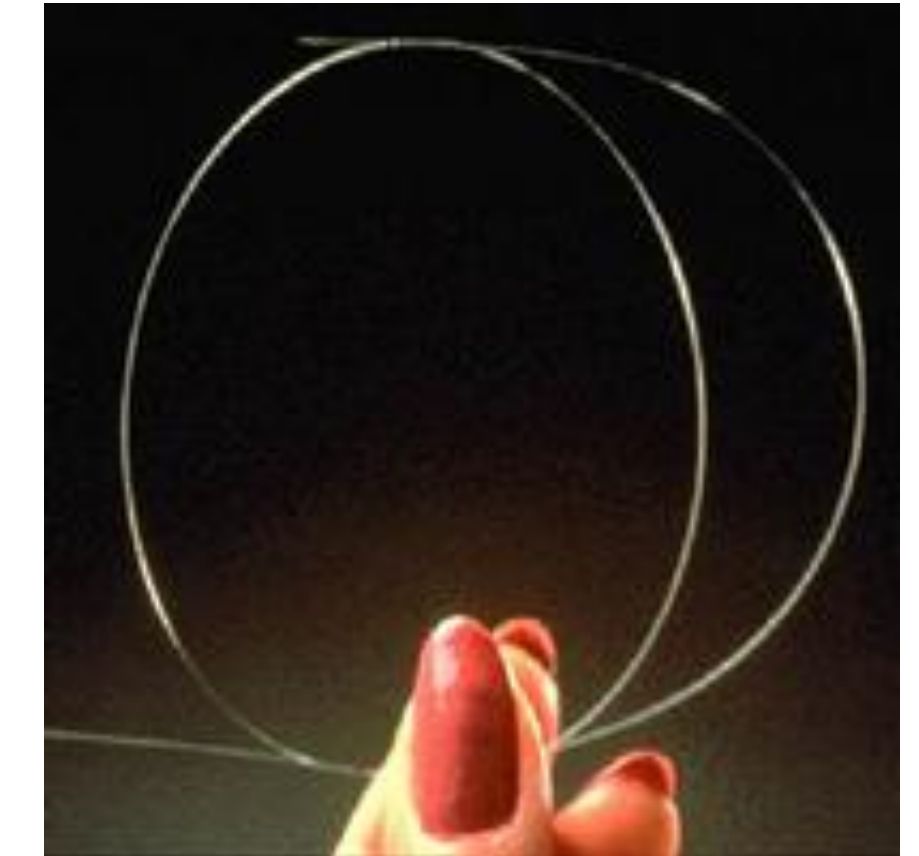
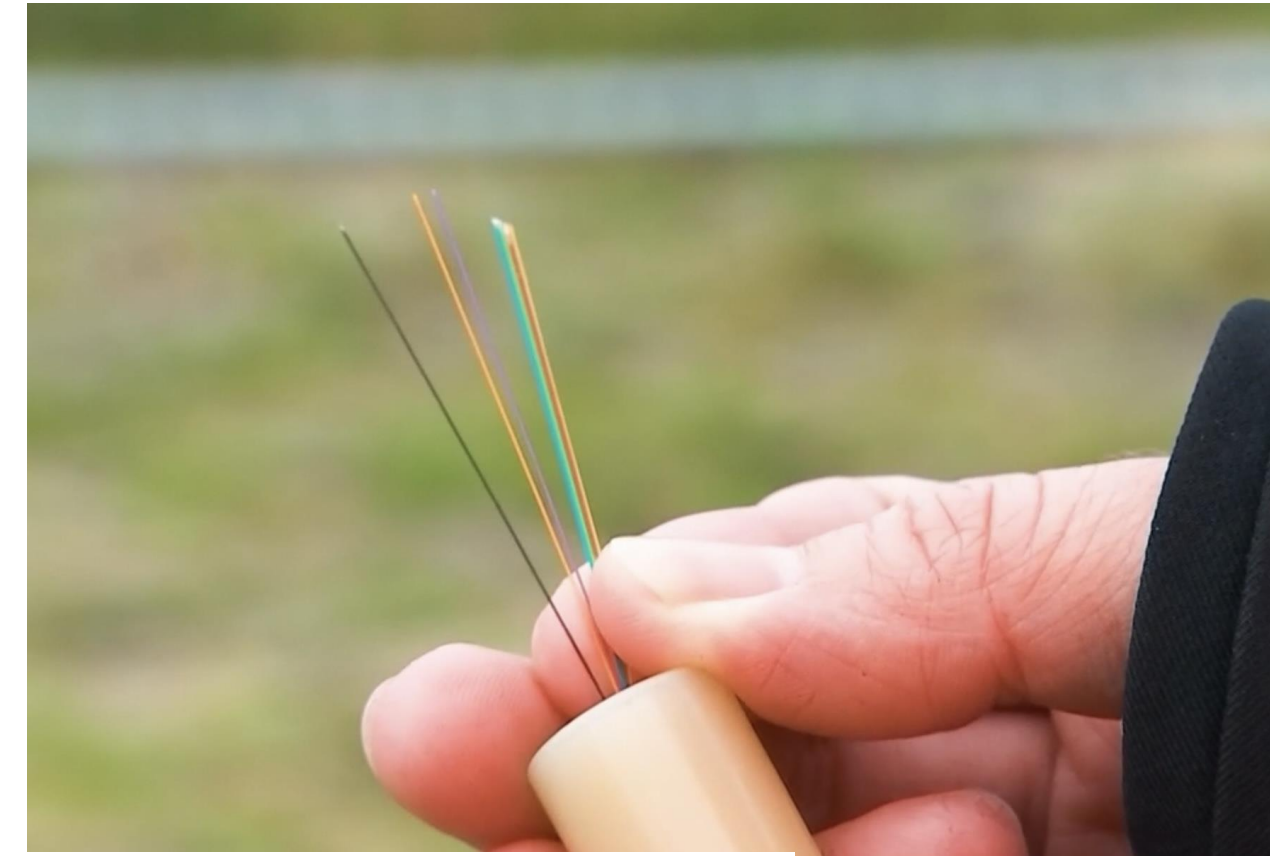
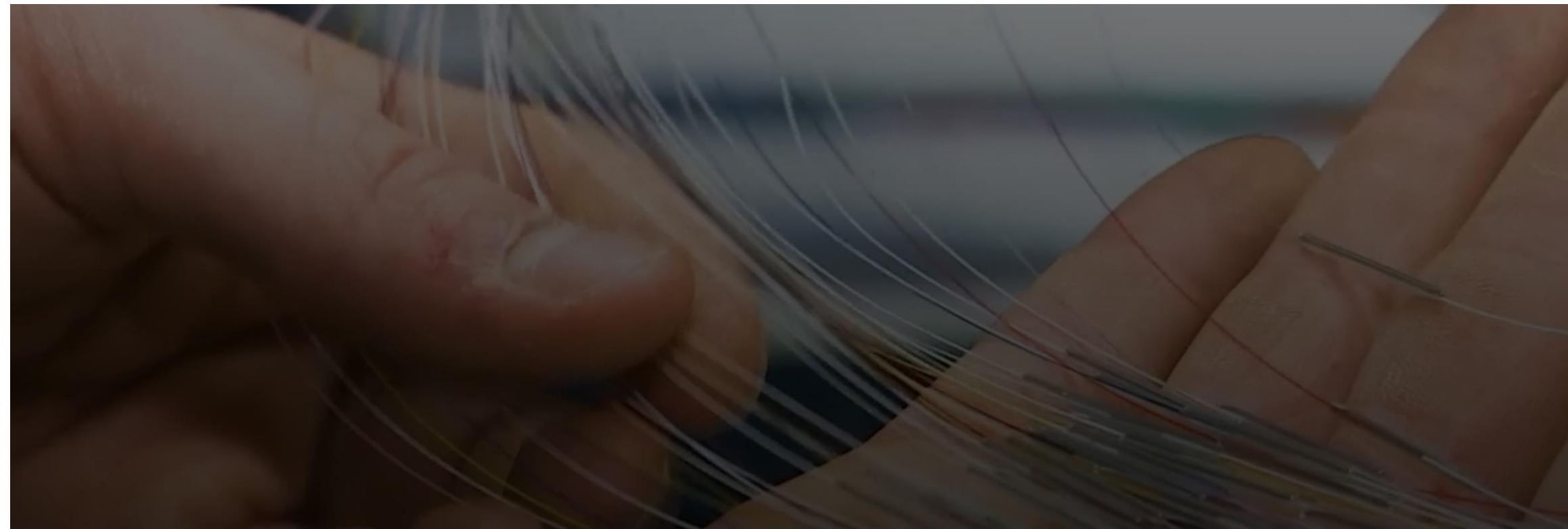
- Mais , nous sommes toujours sur un câble (porteur) cuivre , les pertes en ligne sont repoussées par rapport à l'analogique , mais existent toujours : déformation des signaux , bruit ...
- Nous atteindrons la limite de la Technologie dans les années 1980 , avec le 560 Mbit/s , (exclusivité française exportée aux USA , fief des BELL Lab et AT&T ...) qui permet de transporter simultanément **7680 Voies** par câble (1 paire) coaxial , avec des Répéteurs-Régénérateurs espacés de 2 km .
- Rappelons nous que dans la technologie précédente Analogique , on ne transmettait que **60 Voies** ... (**128 fois moins**) ...
- Il faut à nouveau rechercher une autre solution , car le besoin mondial de transmission explose , les ordinateurs portables bon marché arrivent dans les foyers , le WEB vient remplacer le **Minitel** **rose** ...) !

Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

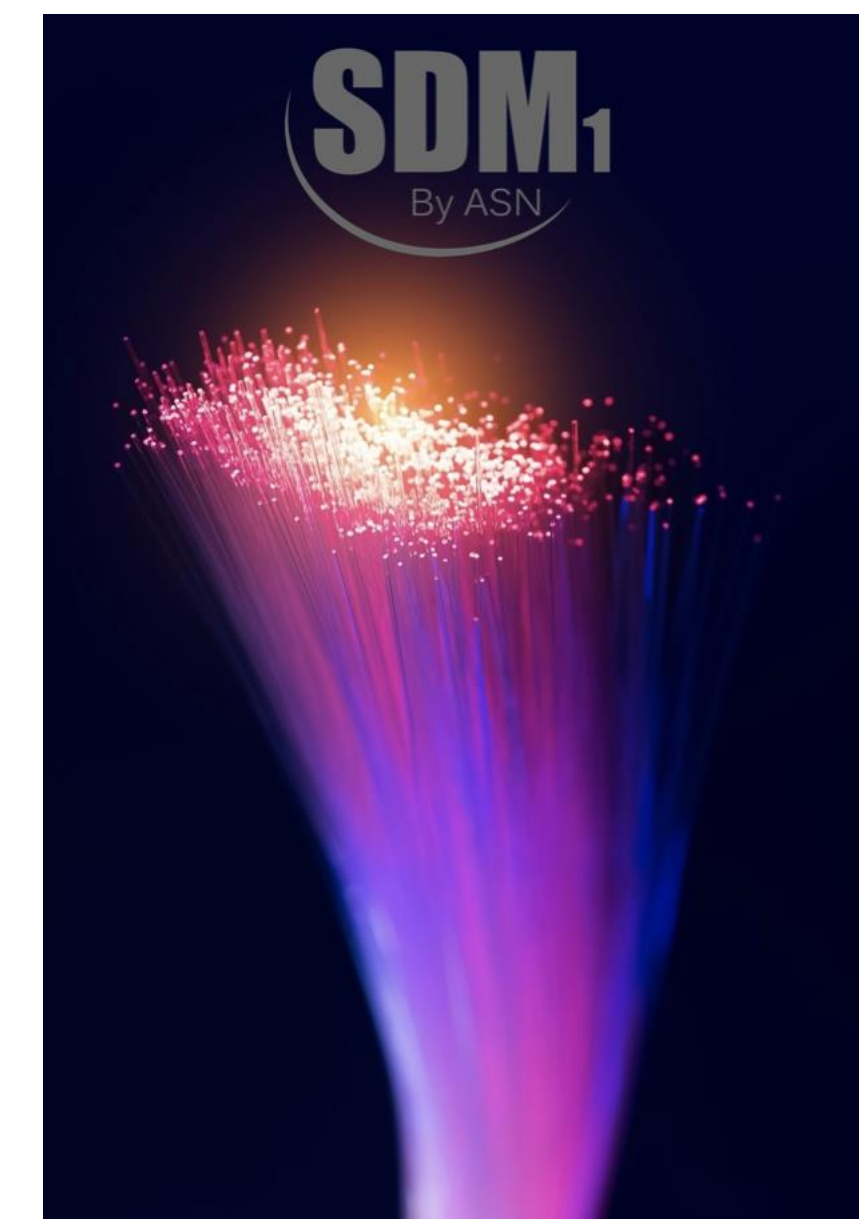
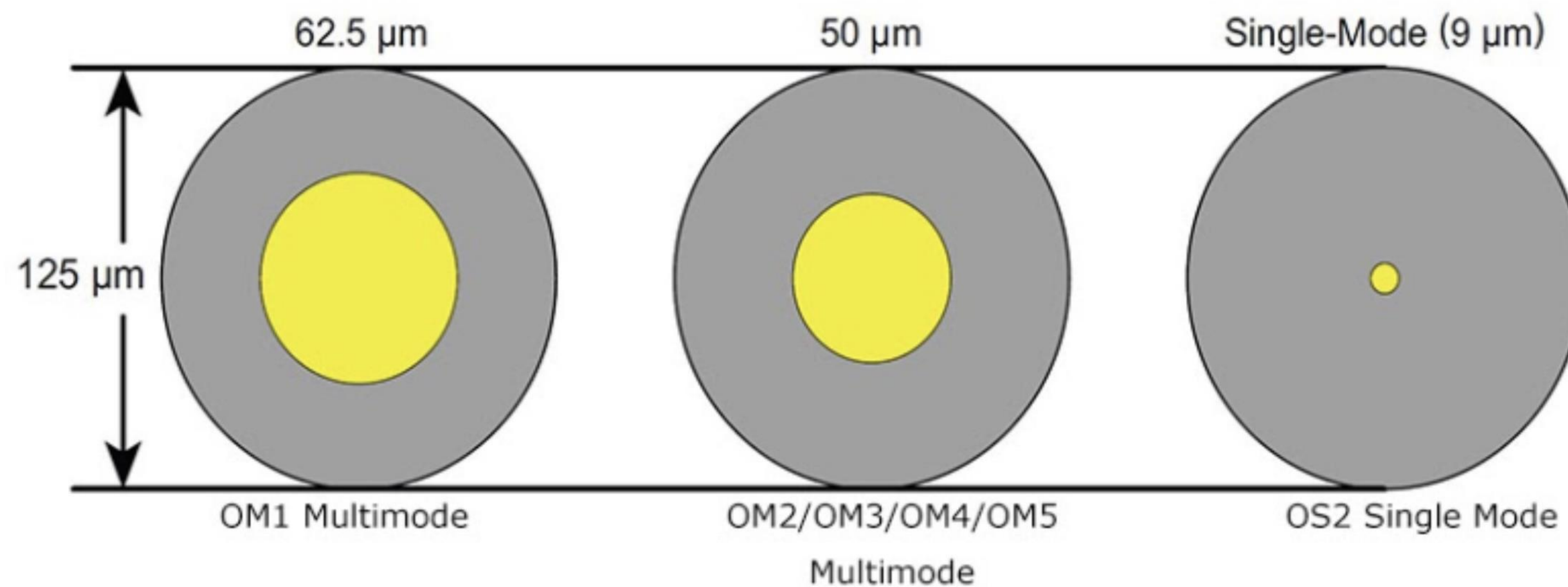
- Et si on passait à la Transmission sur Fibre Optique ...
- Une Fibre , c' est un Guide pour la lumière , composé d'un Coeur de Silice (diamètre 9 à 60 microns) , protégé par une enduction (125 microns) , puis une gaine « plastique ou autre » de diamètre # 2 mm .
- Le signal porteur , injecté dans le Coeur sera de la lumière , elle même modulée par le signal à transmettre , lui aussi « modulé » en 0 et 1 .
- L' émetteur sera une Diode Électro Luminescente (LED) avec un large faisceau lumineux , donc multi longueurs d'ondes (multi raies)
 - ... ou un Laser avec un faisceau lumineux étroit , mono longueur d'onde (λ entre 1533 nm et 1567 nm pour le « pompage optique »).
- On peut déjà pressentir que la transmission d'un signal par de la lumière composée de multi longueurs d'ondes , donc circulant dans la fibre à des vitesses différentes sera difficile à maîtriser ...

Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- 2 types de Fibre coexistent :



Optical Fiber Core Diameters



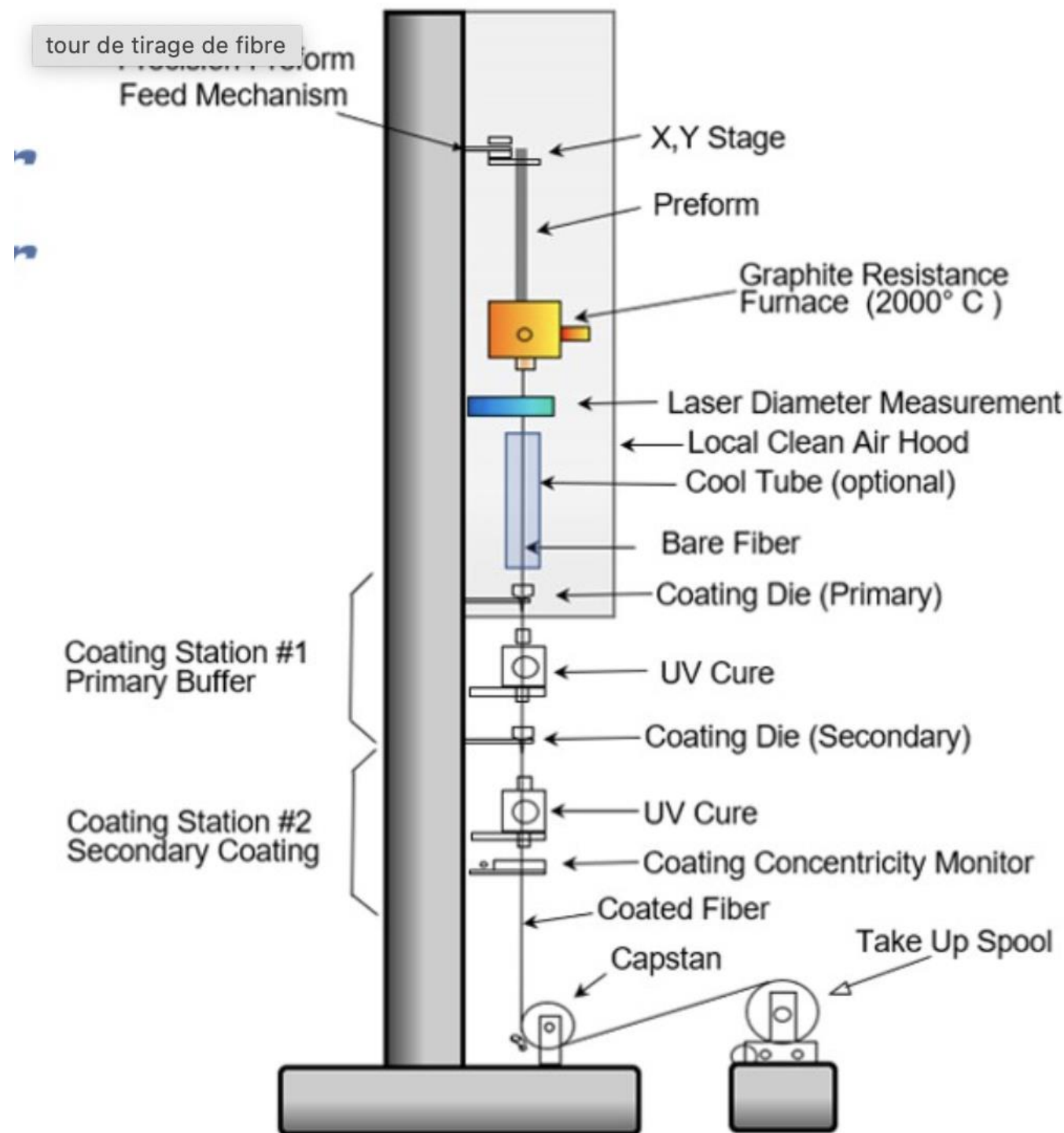
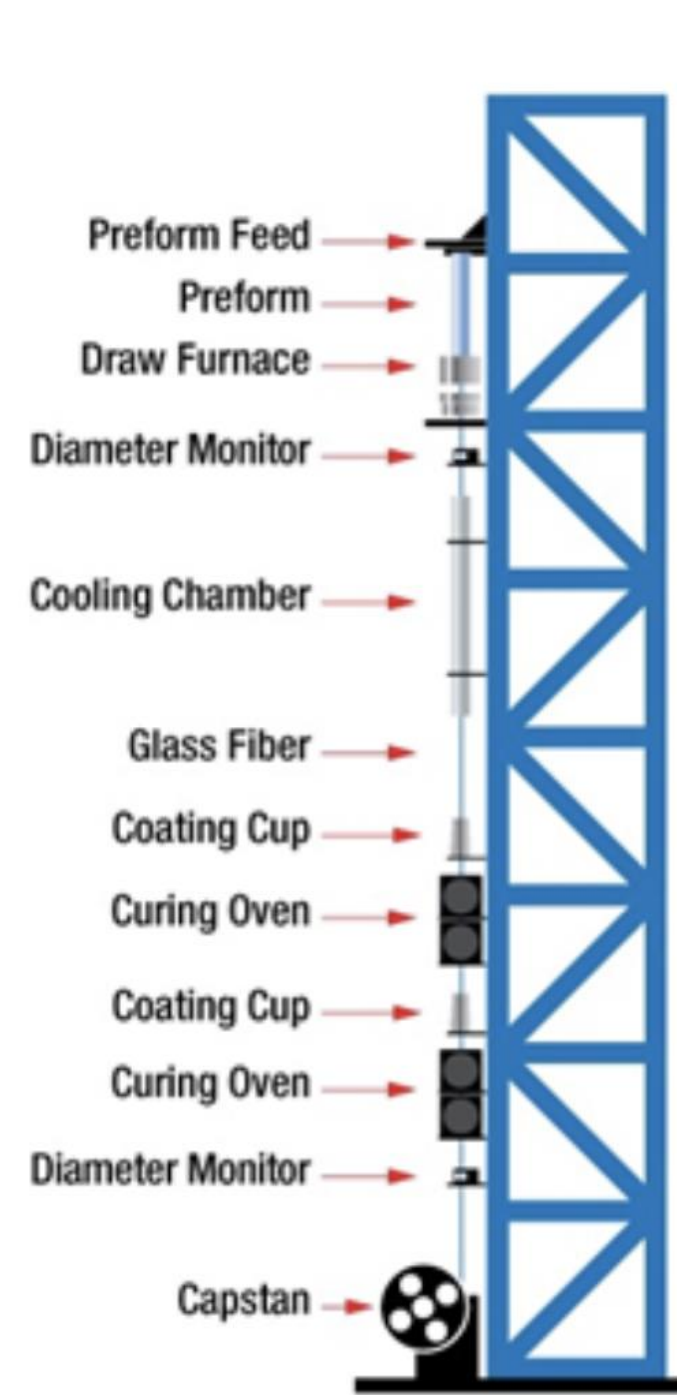
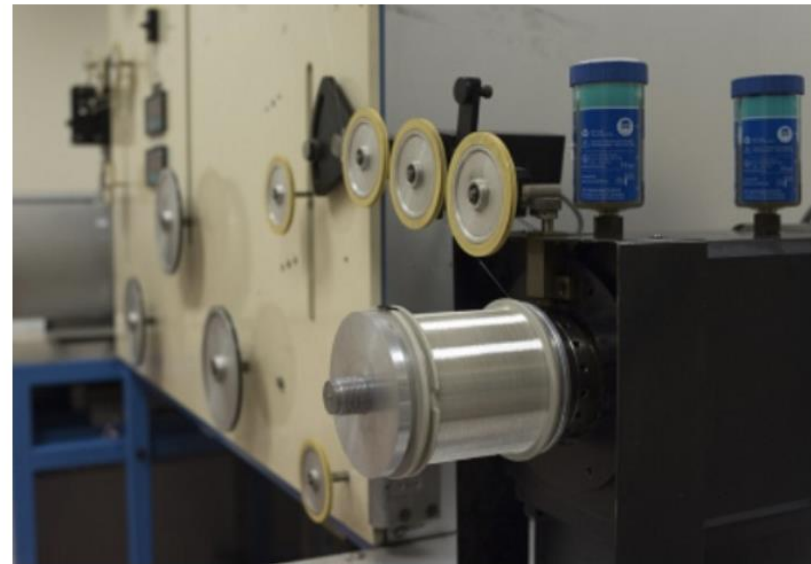
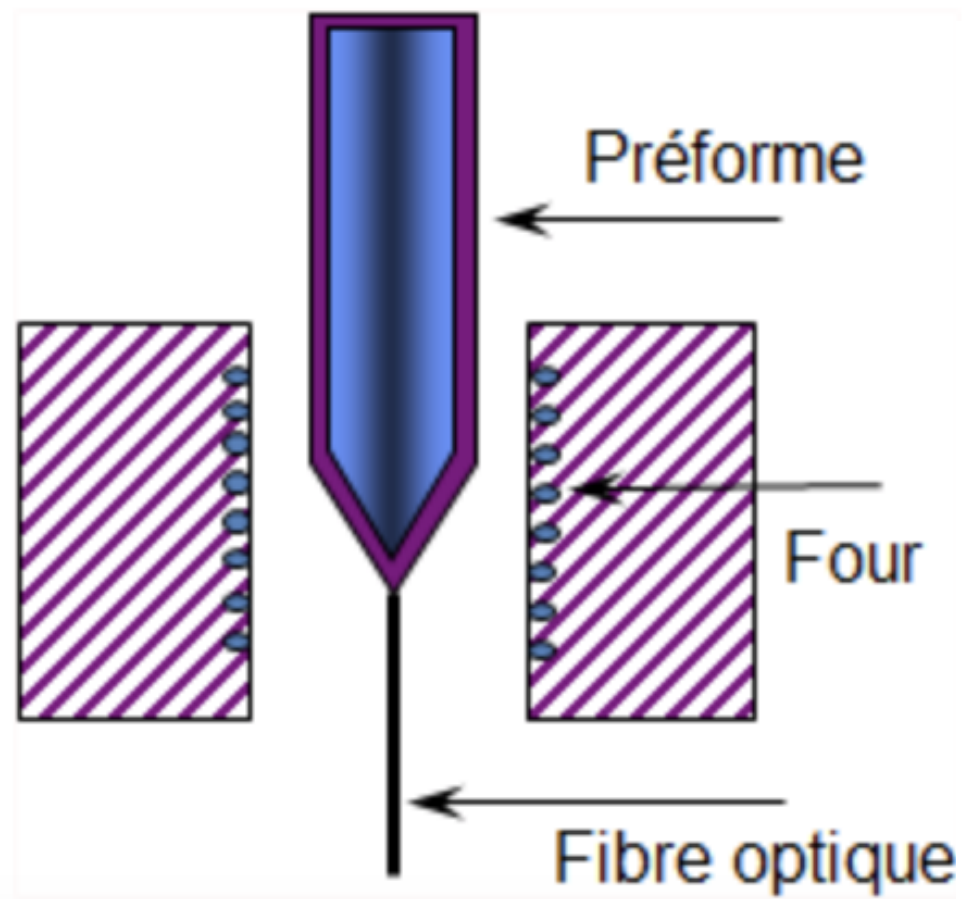
Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS



- Fabrication de la Fibre :
- En fait on part d'une préforme (sorte de carotte ...) en Silice (SiO_2), dopée par des éléments chimiques selon l'utilisation (Ex Fibre dopée Erbium pour les Ampli Optiques/Répéteurs Sous-Marins de type **EDFA** : **E**rbium **D**oped **F**iber **A**mplifier , mais aussi ,dopage au Fluor (F) ou au Chlore (Cl) ...)
- On chauffe cette préforme , en haut d'une tour d'étirage , de façon à ce que la Silice dopée s'écoule en 1 fil fin (diamètre #60 à 2 microns selon la fibre) .
- Puis polissage afin d'obtenir une surface périphérique homogène ,minimisant les réflexions (retour) du signal optique .
- Ensuite on enduit ce fil de Silice par une enduction , puis par une ou plusieurs gaines de protection , selon l'usage .

Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- Fabrication de la Fibre :



- Les paramètres , notamment diamètre , sont vérifiés en continu lors de la fabrication .
- On peut fabriquer des longueurs de l'ordre de 45 km en une seule passe .

Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

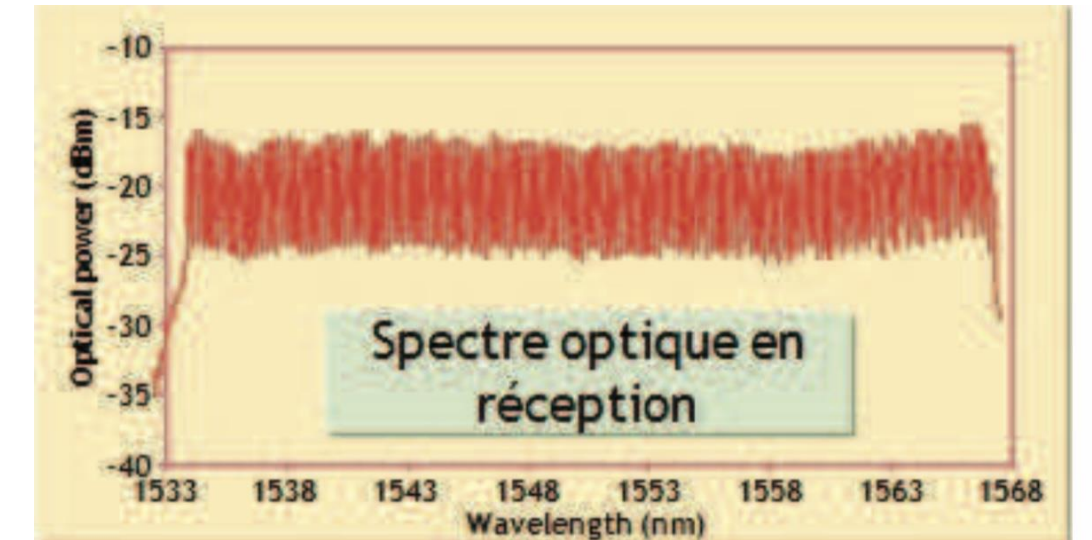
- Ces 2 Technologies vont se succéder , et cohabitent encore :
- 1) **La fibre Multimodes** : Coeur optique de # 60 microns , Émission en Ligne par Une Diode Électro Luminescente (DEL/LED) , **solution plus économique** , et **maîtrisée** à l'époque , par les fabricant de composants (fibre et DEL).
 - **La ville de Biarritz a été complètement câblée avec cette technologie dans les années 1990 .**
- **Malheureusement cette technologie est trop complexe pour des longues distances , avec des phénomènes perturbateurs (perte en ligne , bruit , déformations du signal dues aux temps de propagation différents des longueurs d'ondes) , proches des solutions analogiques .**
- **Mais , à l'origine , les composants mono raie (Laser) étaient rares et très chers .**

Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- La Fibre Multimodes et LED sont maintenant réservées aux transmissions de courte distance , entre le dernier Équipement électronique (Central , Répartiteur) et le client final (Box) .
- Encore aujourd'hui , une fibre Multimodes coute 5 fois moins cher qu'une Monomode , et il y a un rapport 1000 entre les coûts DEL et Laser.
- L' affaiblissement (du signal optique transmis dans une fibre Multimodes est 30 fois supérieur à celui d'une fibre Monomode , principalement du à la dispersion chromatique qui déforme les signaux en ligne .
- Cette Technologie ne va pas déboucher pour les liaisons grandes distances , inter Continentale

Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- Caractéristiques des différentes Fibres Optiques en Silice :



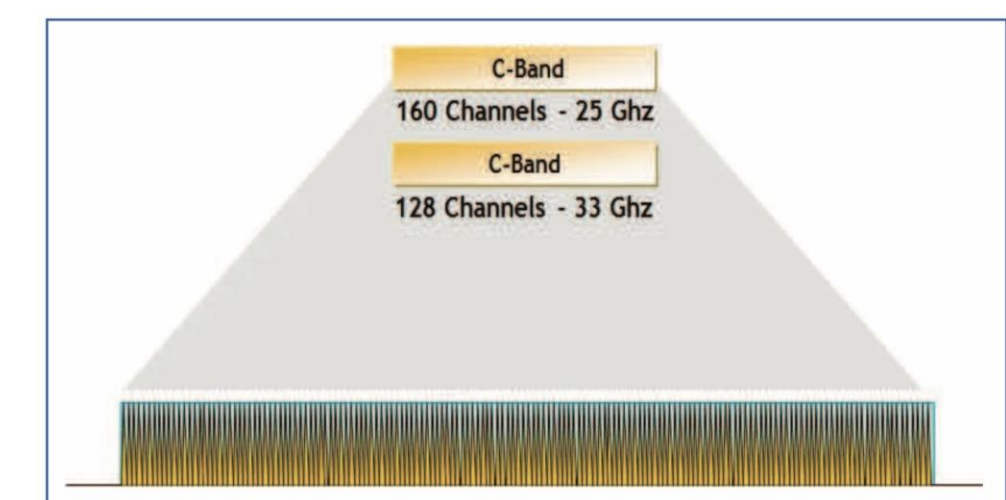
Fibre unimodale	Fibre multimode
Faible dispersion	Forte dispersion
Connexion délicate	Connexion facile
Faible atténuation	Forte atténuation
Hauts débits, longues distances	Réseaux locaux

- Il existe aussi des Fibres Optiques en Plastique , utilisées pour les interconnexion des appareils domestiques (Ex : TV -> Home Cinéma) .
- Les pertes sont alors très importantes , mais pas gênantes pour l'usage .
- Le coût en est beaucoup plus faible .

Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- 2) On passera (relativement) rapidement à la **Transmission Optique Monomode**, fibre Coeur 9 microns, Émetteur Laser mono raie.
- Et tout va exploser, en 10 ans de 7680 Voies par paire coaxial Cuivre 560 MBits/s, à 560 GBits/s (1000 fois plus), et avec la possibilité de mettre plusieurs fibres sur le même câble, puis 100 TBits (encore un facteur 10000 ...).
- En comparaison, une liaison satellite **O3b Networks de Google**, avec **16 satellites** transmet de l'ordre de **160 GBits** ... avec un temps de propagation « audible » (décalage important entre question et réponse, vitesse de l'onde électrique 3km/s)
- Aujourd'hui, un câble sous-marin de 16 fibres (8 paires) transmet 160 TBits, soit 1000 fois plus ... et à la vitesse de la lumière, donc très peu de décalage entre question et réponse (vitesse de la lumière 300000 km/s), et **demain (en 2022), 220 à 230 Longueurs d'ondes à 100 GBits par paire (220x8x100 = 176000 GBits, encore 1 facteur 100...)**

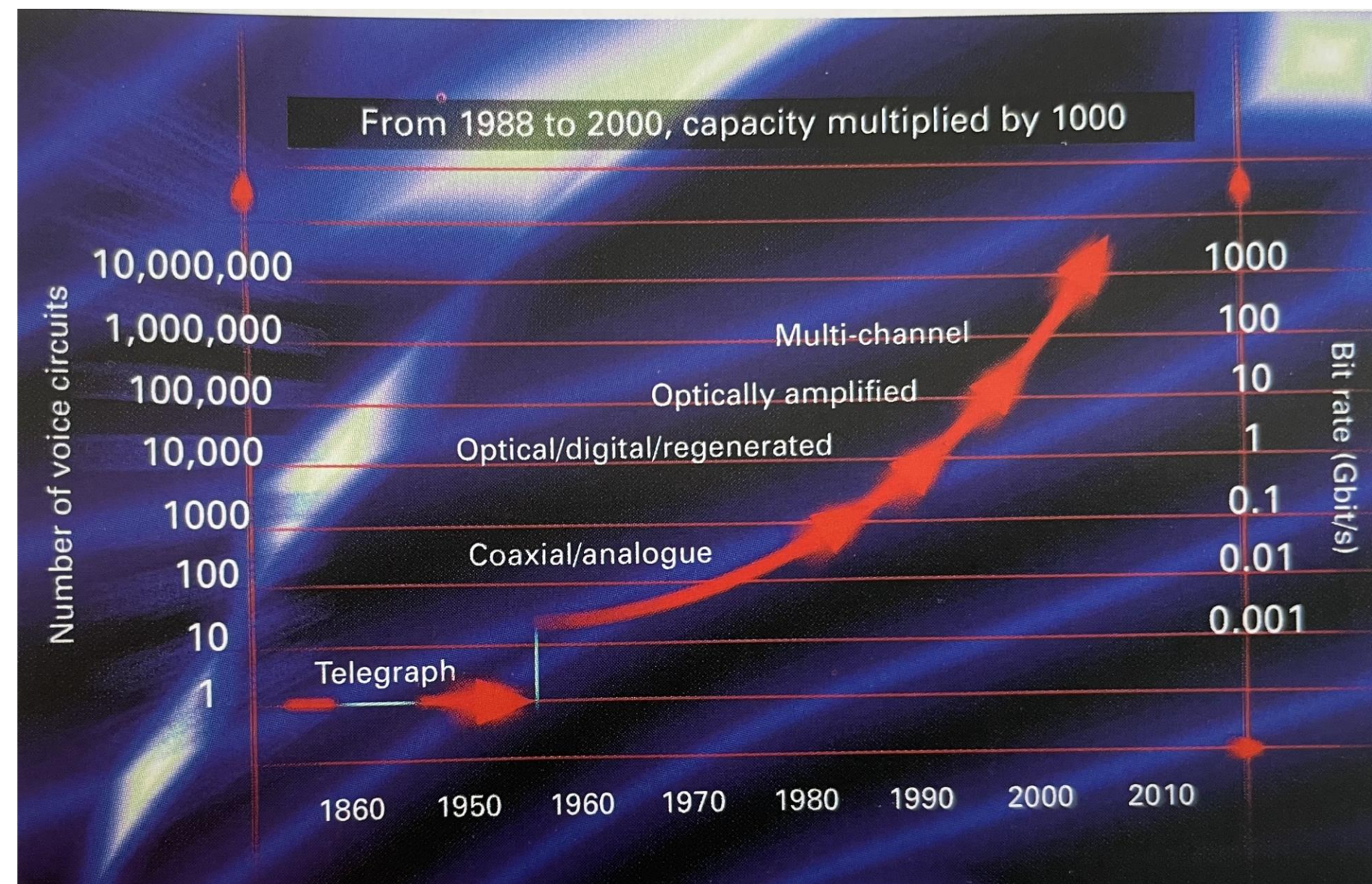
La capacité transportée par une fibre optique est ainsi le nombre de canaux qui est le rapport de la bande passante disponible sur l'espace spectral entre canaux.
La limitation physique de la capacité ultime sur une ligne sous marine est donnée par les qualités de la ligne elle-même: performances OSNR (rapport signal à bruit), type de fibres, et bien entendu la performance des transpondeurs eux-mêmes.



- **Alors maintenant, rentrons dans le Monde de la Transmission Sous-Marine ...**

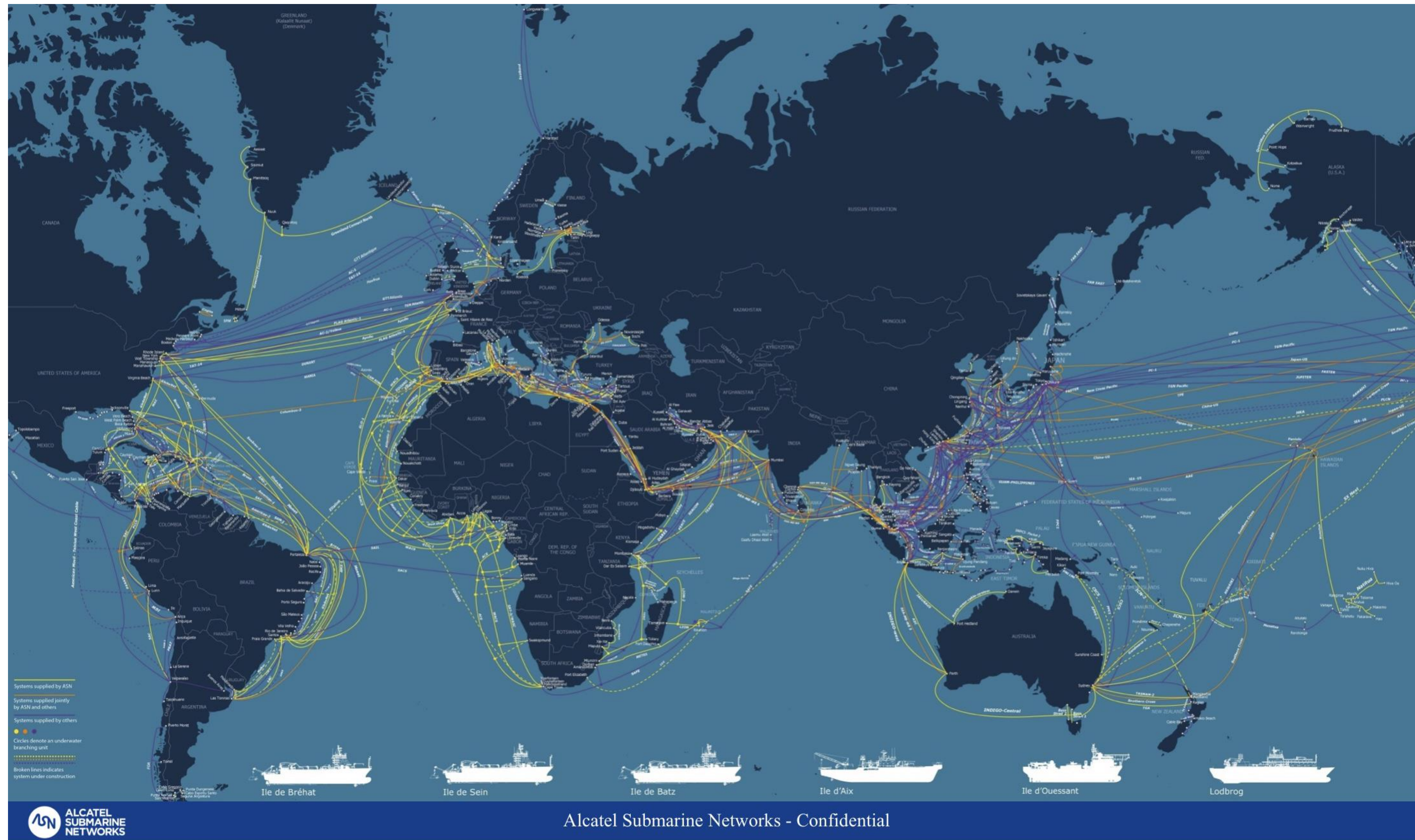
Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- Quel est ce monde , ça sert à quoi , comment ça marche ???

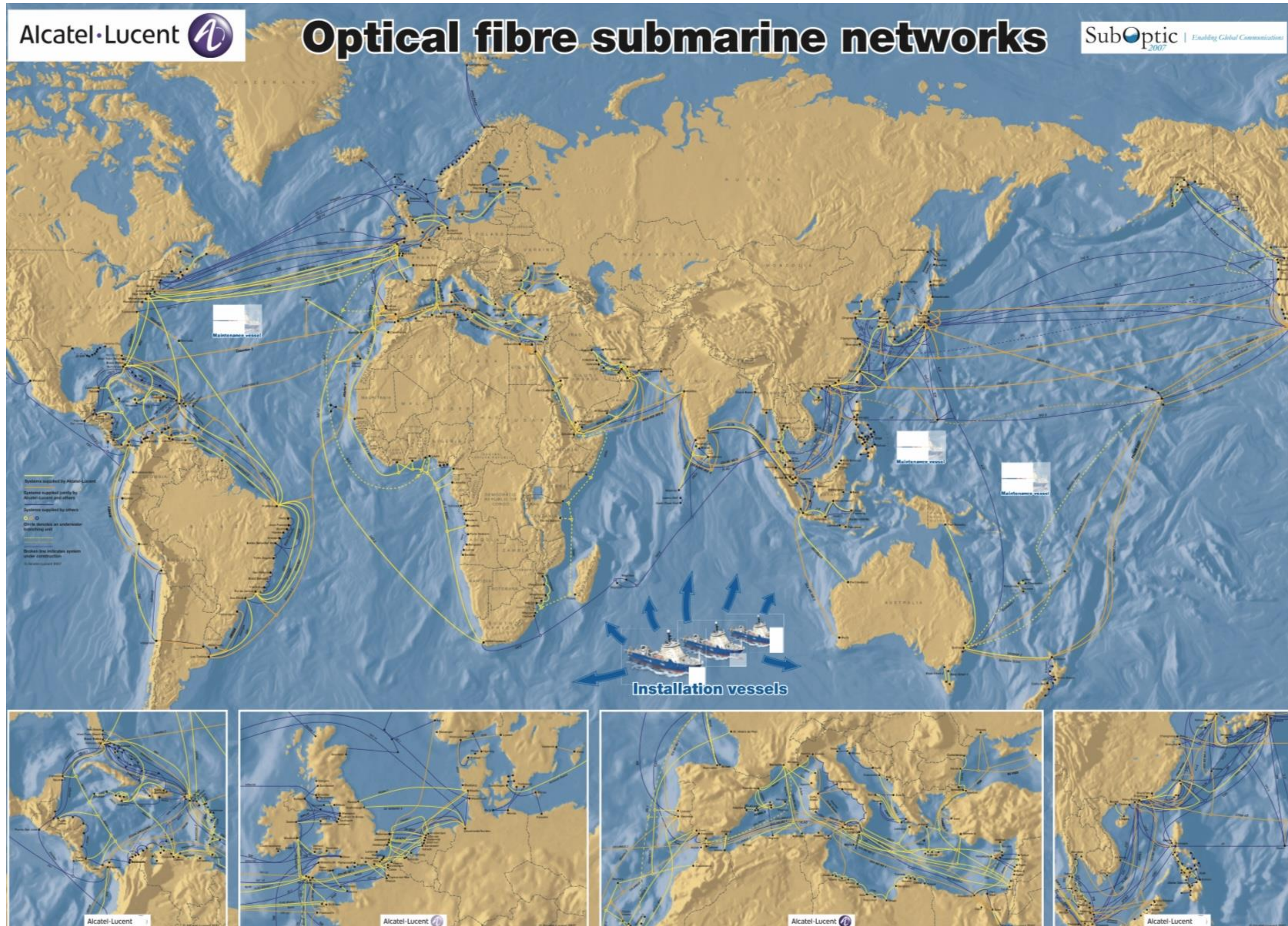


Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

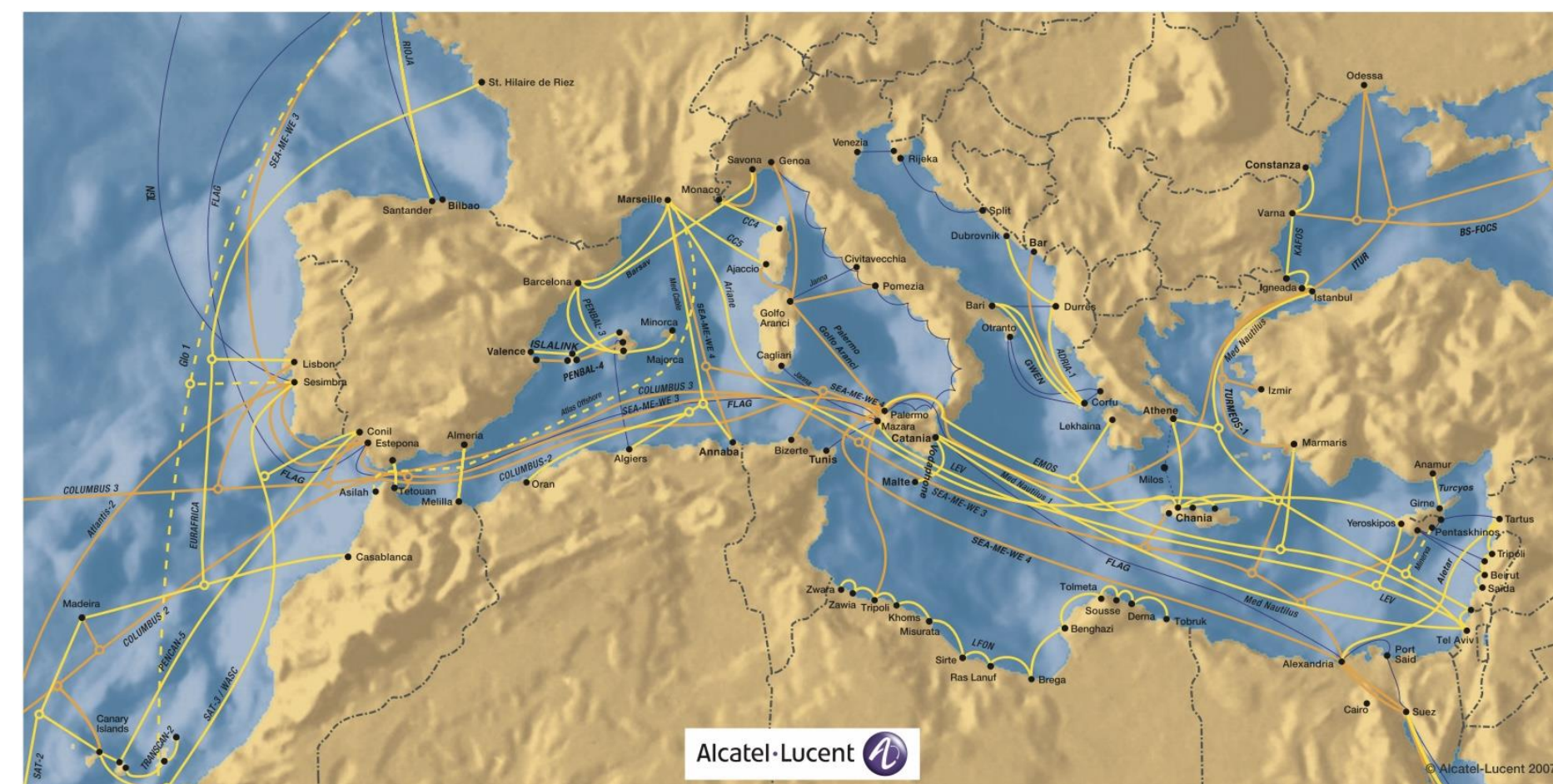
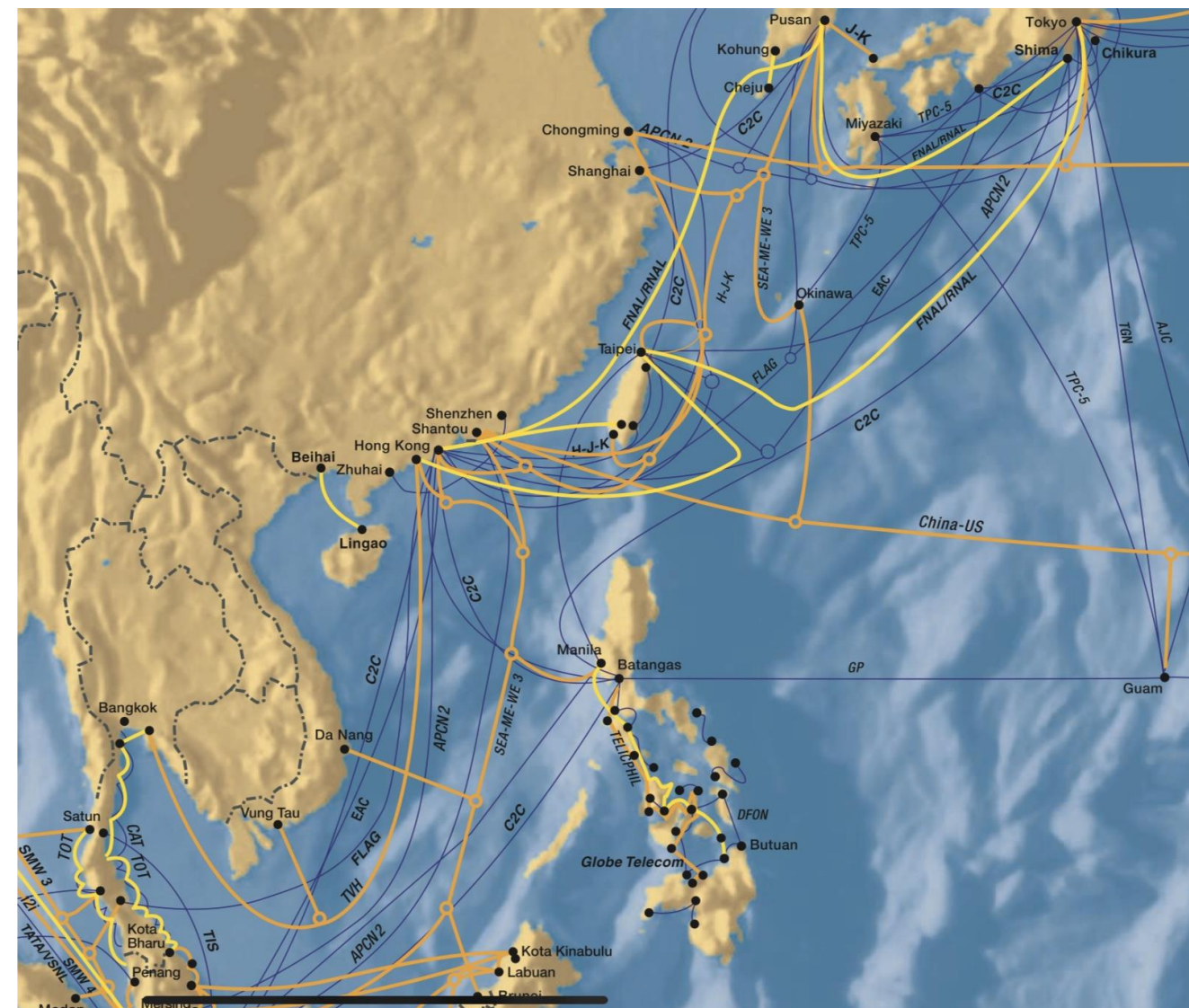
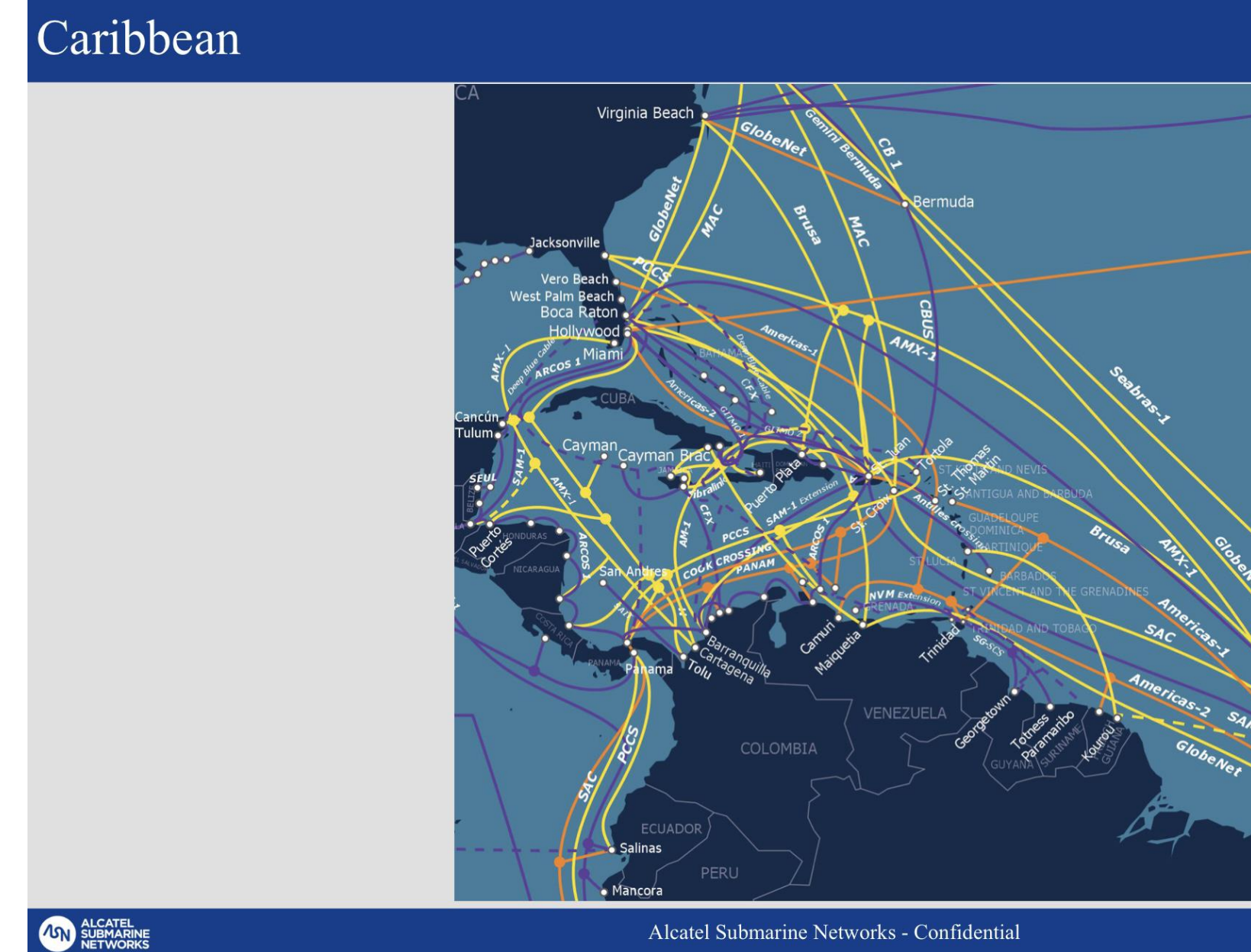
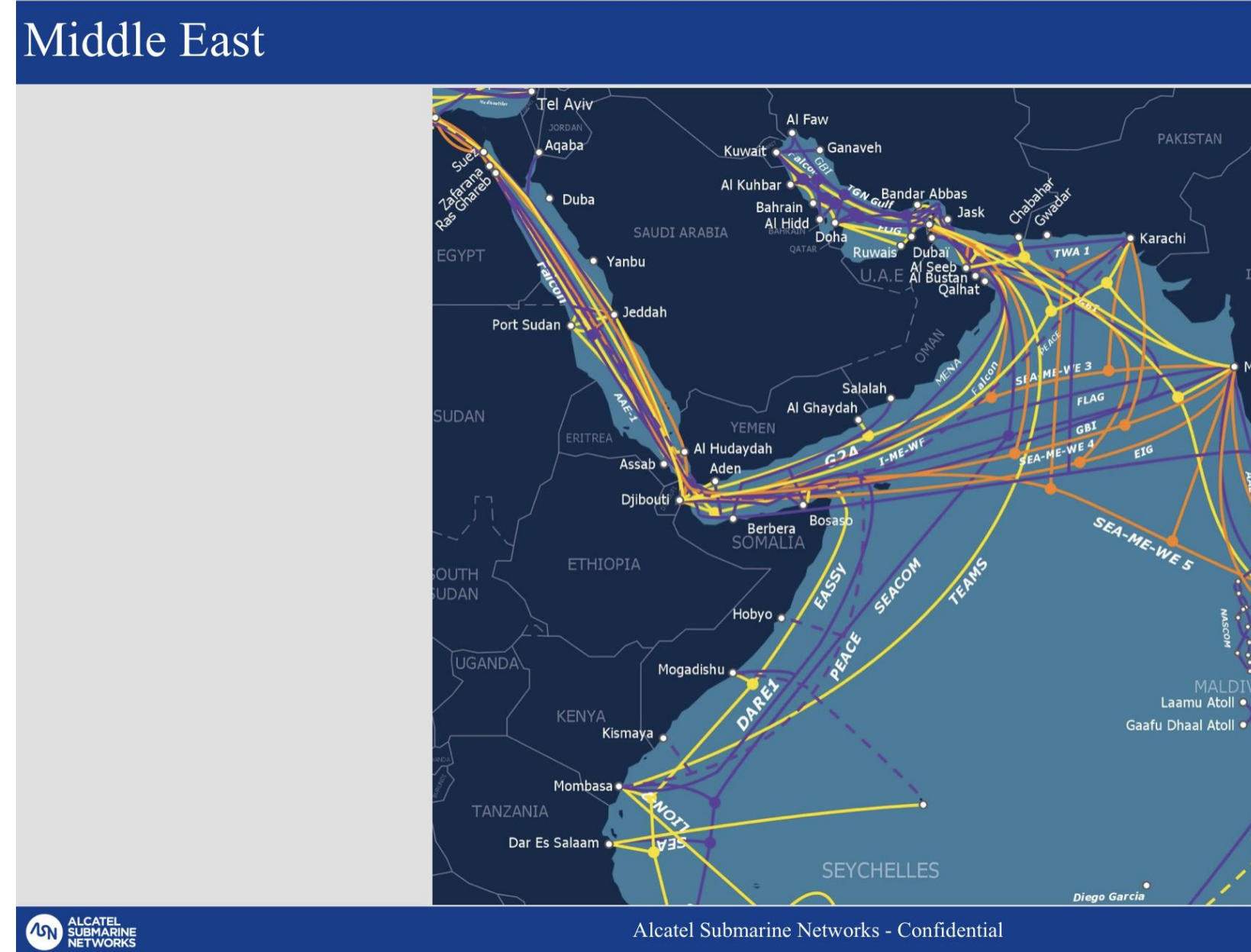
- Réseau mondial des Câbles Sous-Marins :



Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

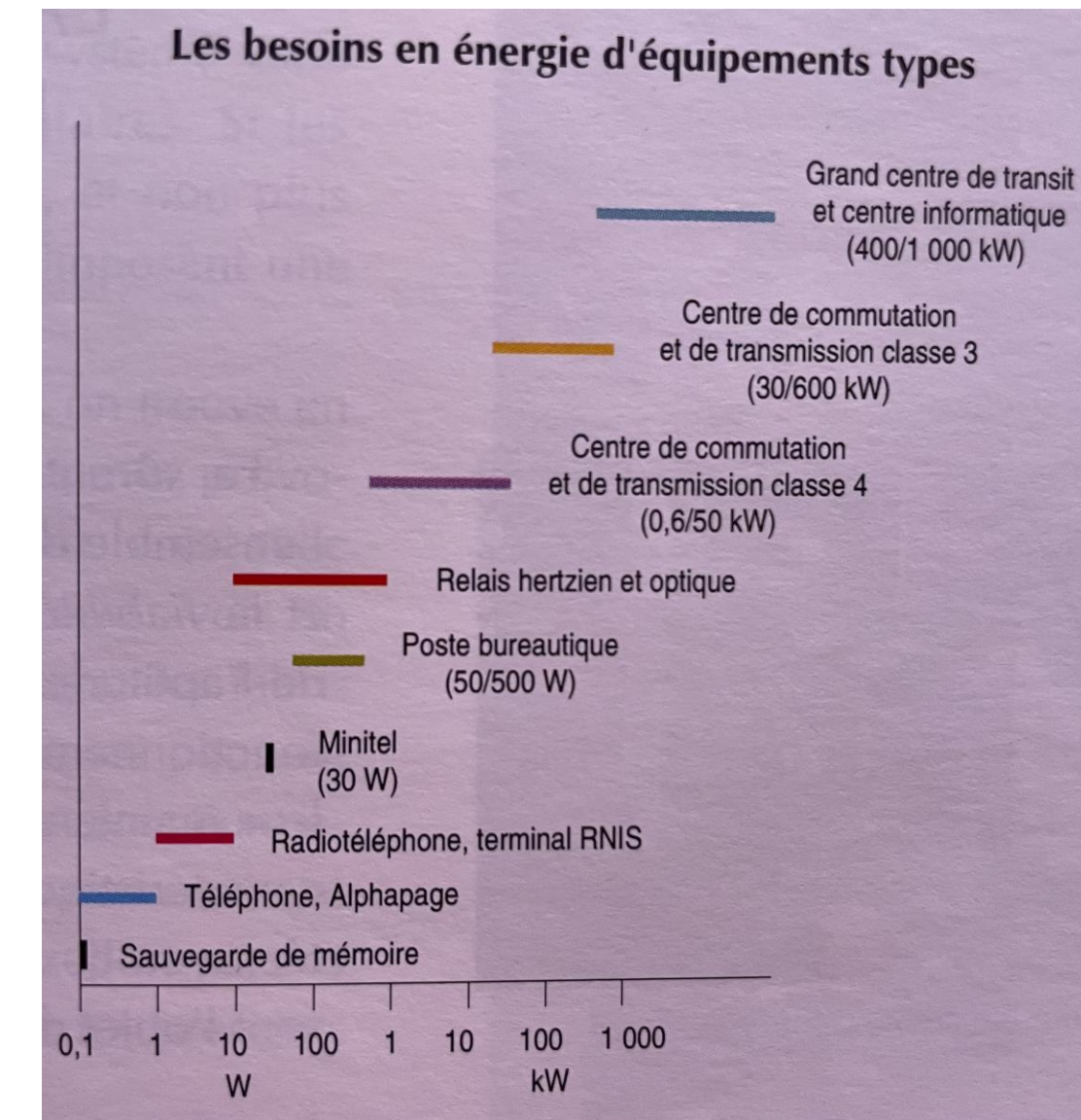
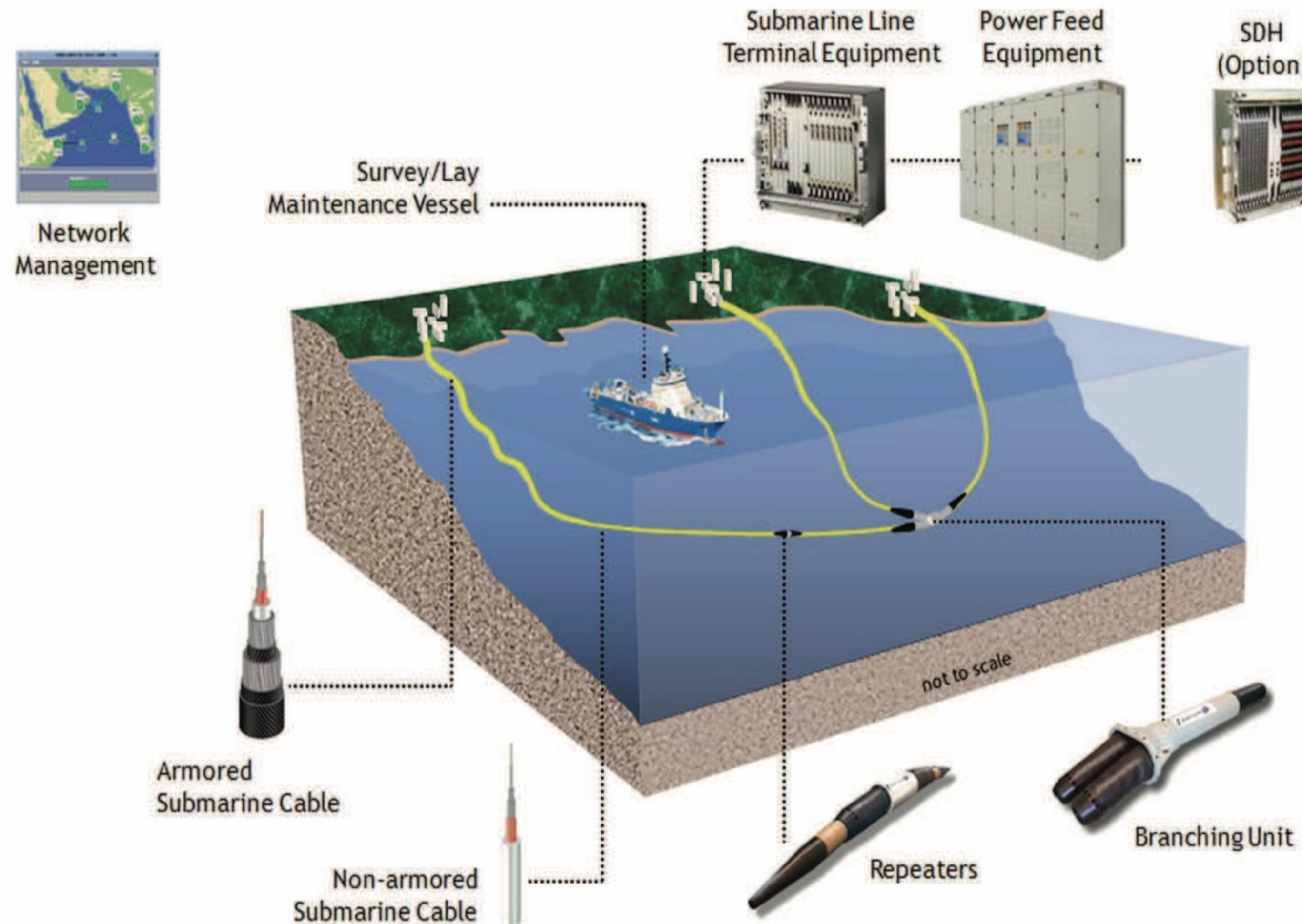


Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS



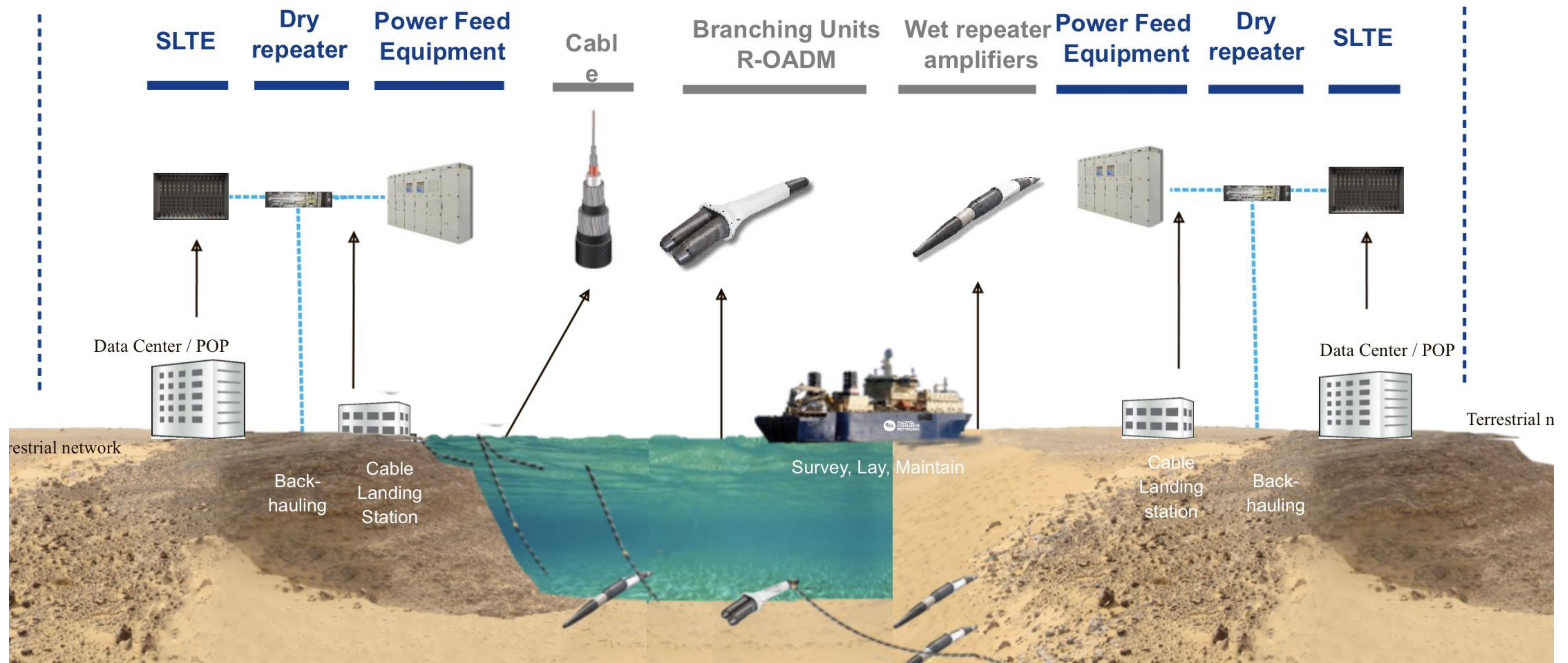
Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- Principaux équipements nécessaires dans une liaison Sous-Marine : SLTE , Câble , Répéteurs , Branching Unit , Télé-alimentation (15000 Volts) , ... et un Navire câblé ...



Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- Principaux équipements nécessaires : SLTE , Câble , Répéteurs , Branching Unit , Télé-alimentation (15000 Volts) , ... et un Navire câblé ...



Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- Navire câblé

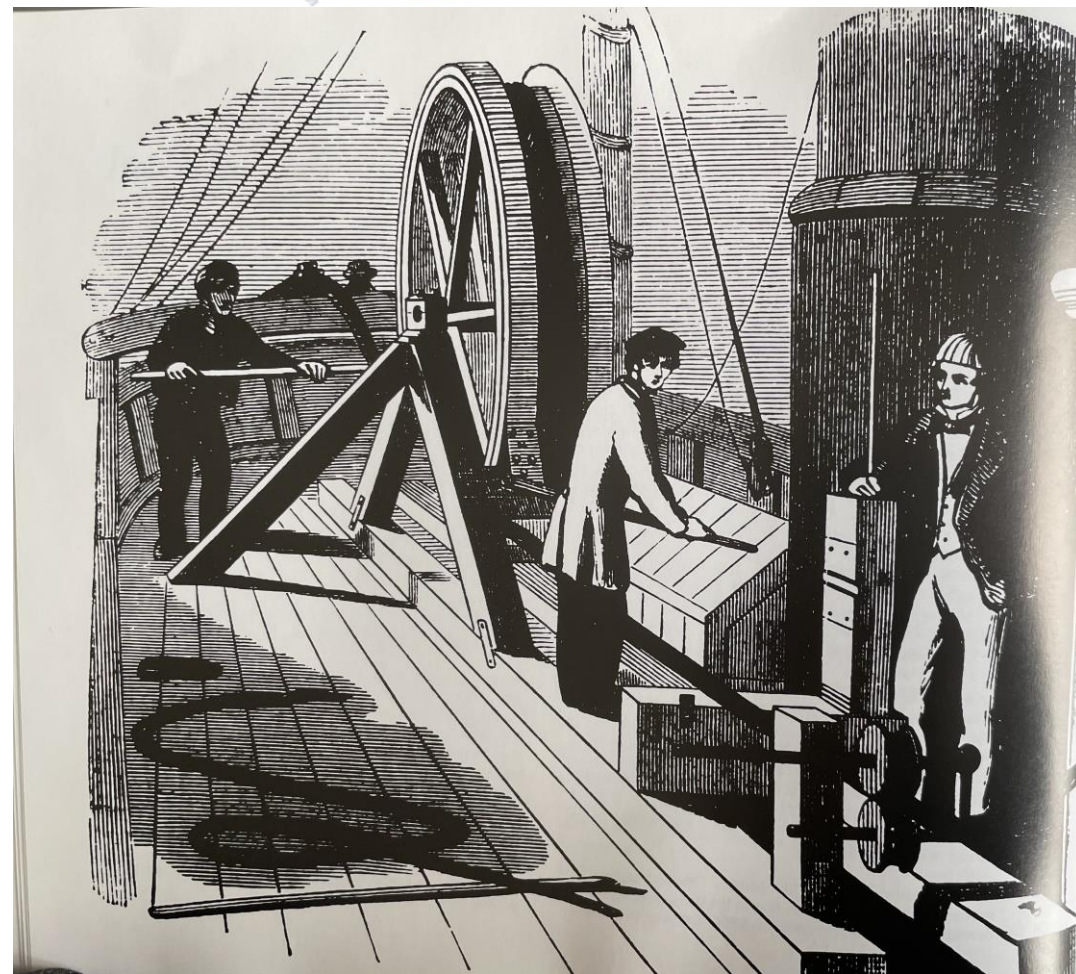
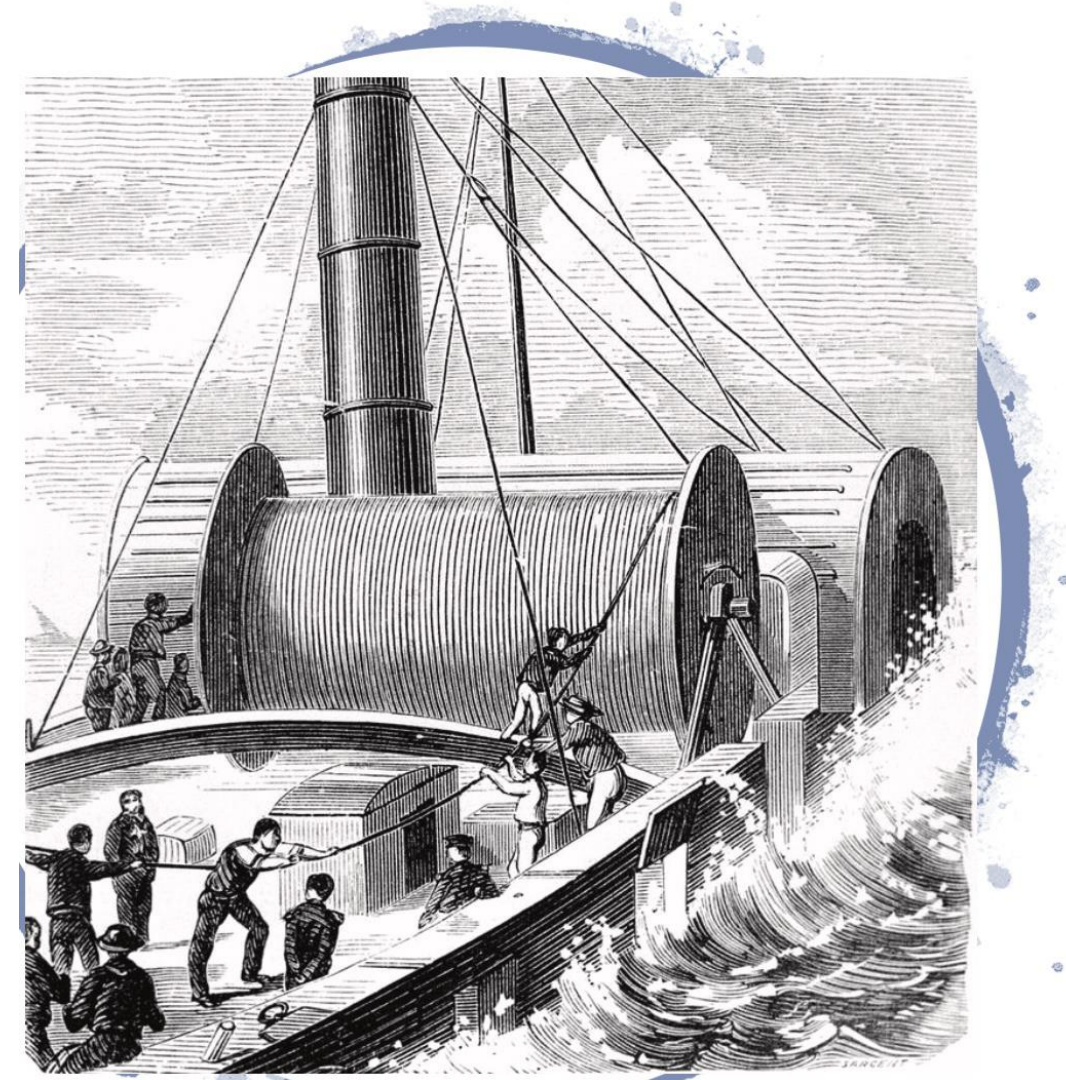


Pose du Câble



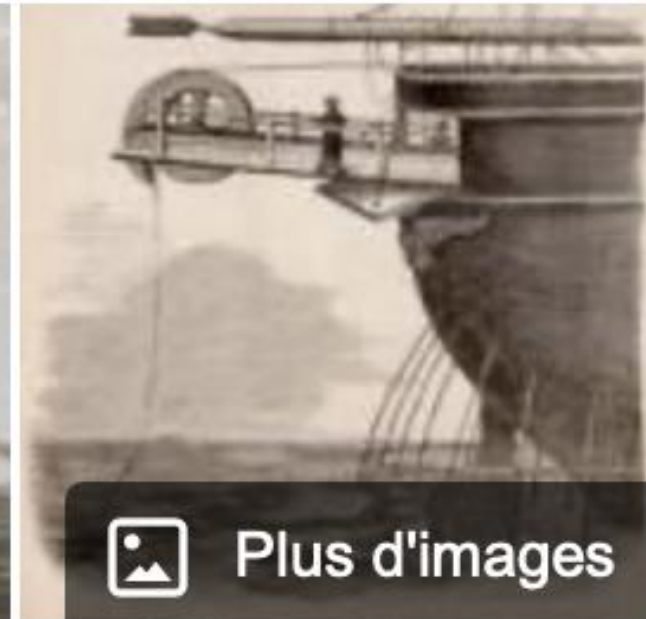
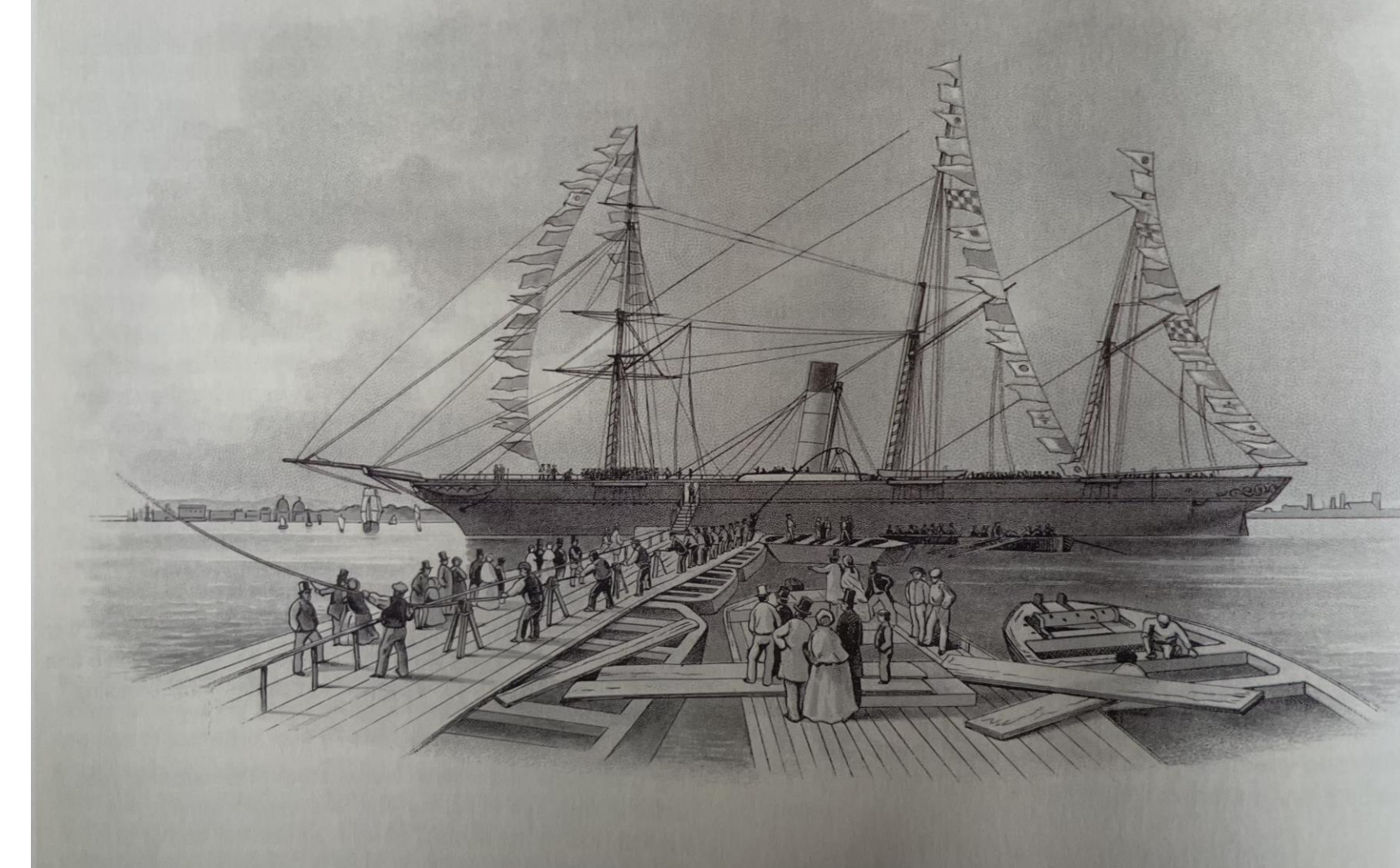
Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- Évolution du Navire câblé entre 1870 et 2000 :



Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- Évolution du Navire câblé entre 1870 et 2000 :



 Plus d'images

Câbles télégraphiques transatlantiques



Les câbles télégraphiques transatlantiques sont des câbles sous-marins posés sur le fond de l'océan Atlantique et qui étaient utilisés au XIX^e siècle et dans la première moitié du XX^e siècle pour les communications télégraphiques internationales.



Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

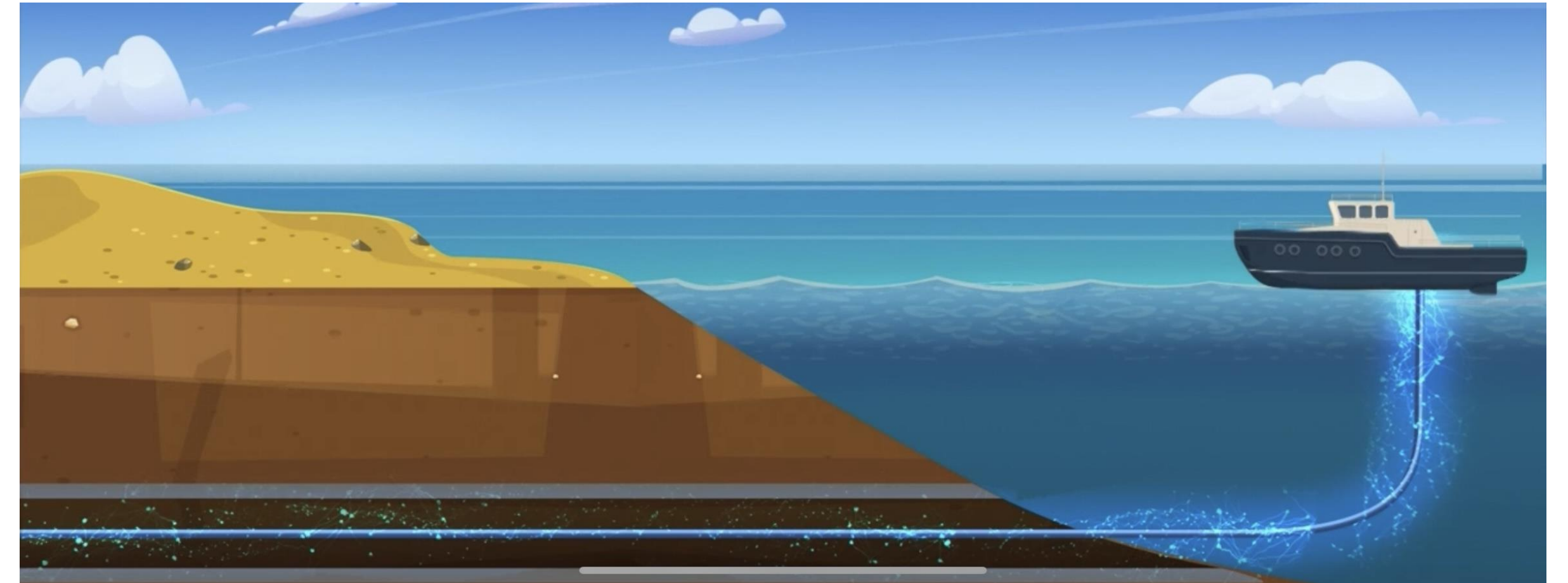
- Quelques Navires câbliers ASN et Orange (Français !) et autres

⋮



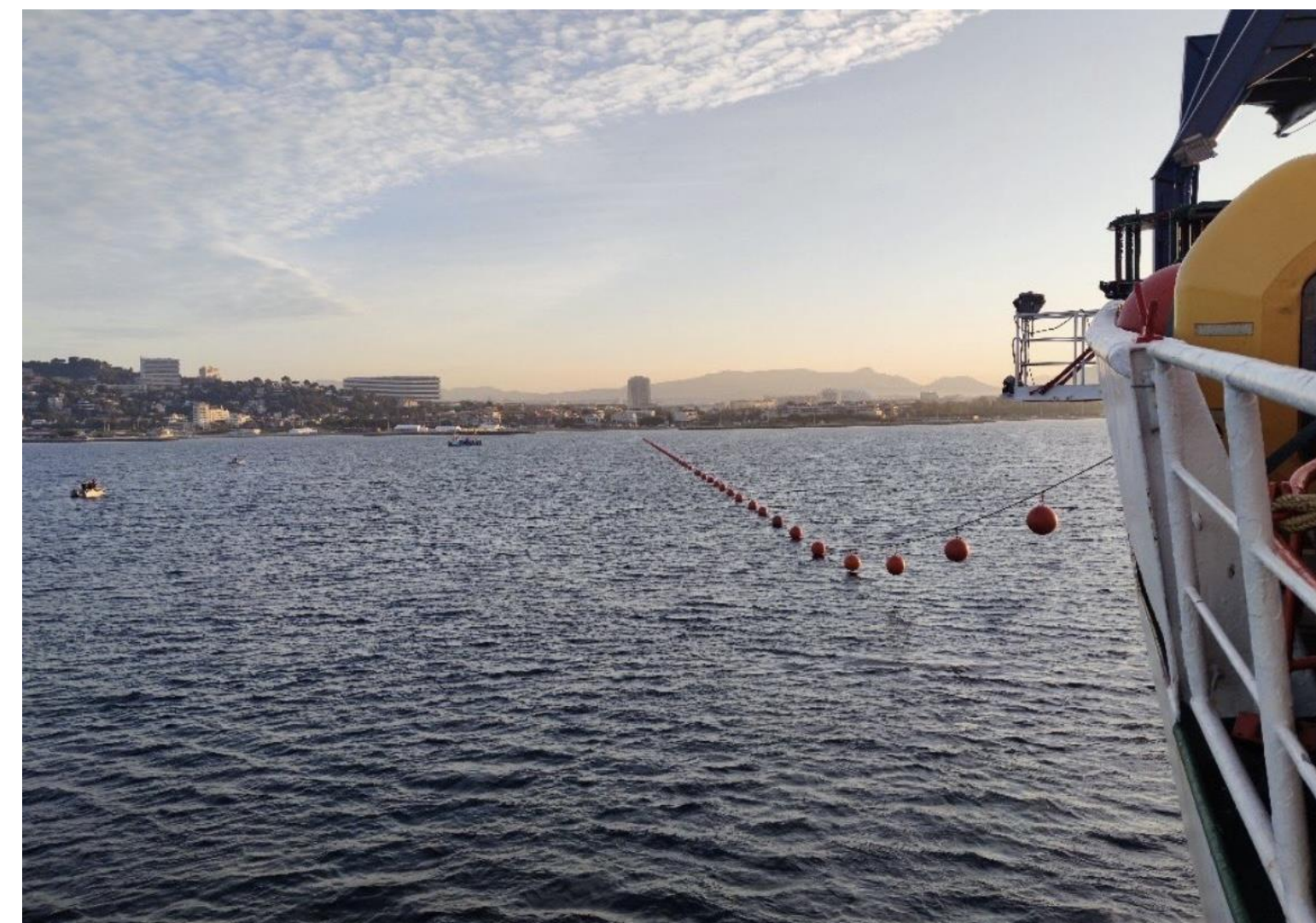
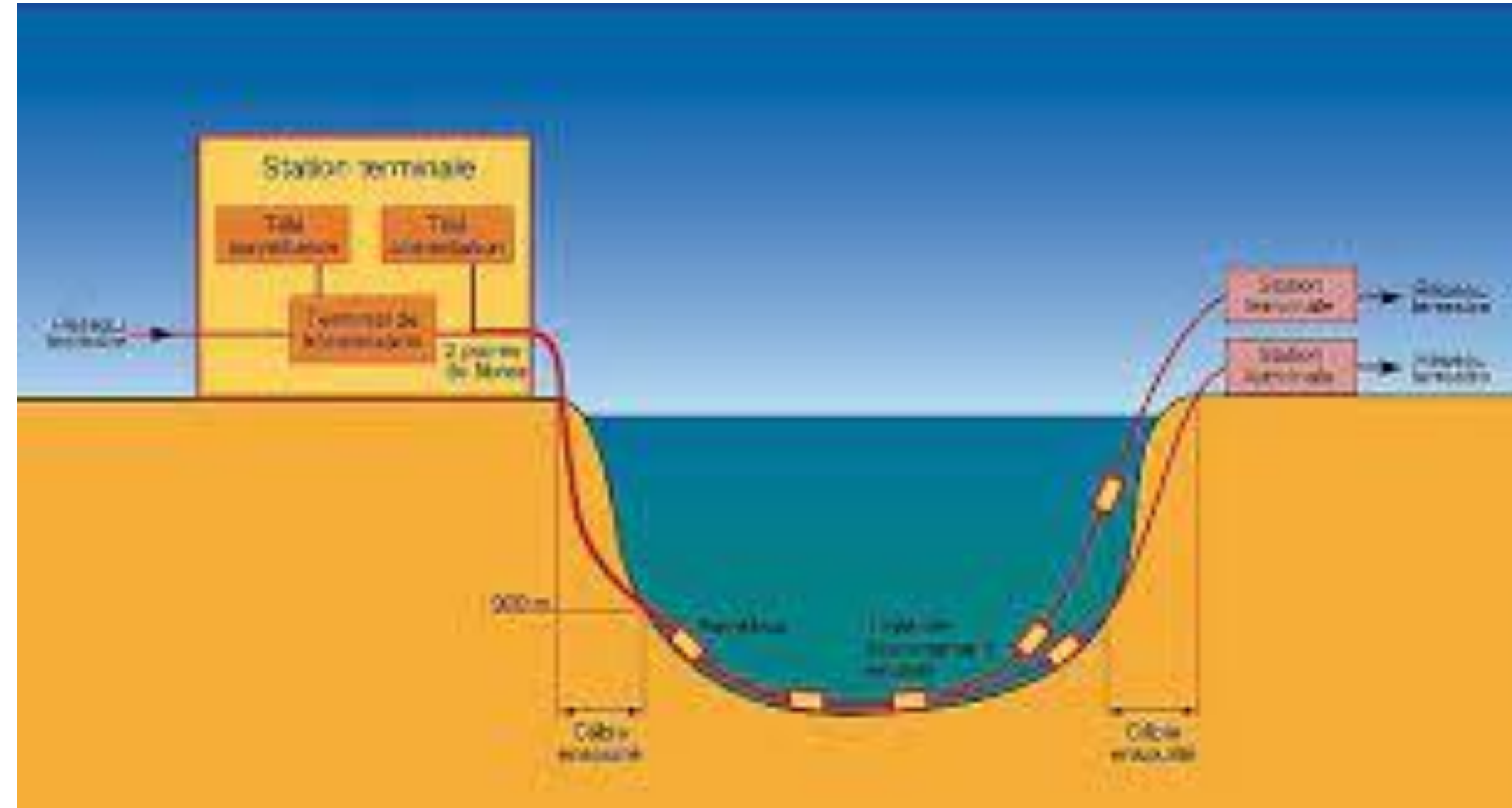
Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- Câblier proche Station Terrestre :
- Pose du Câble :



Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

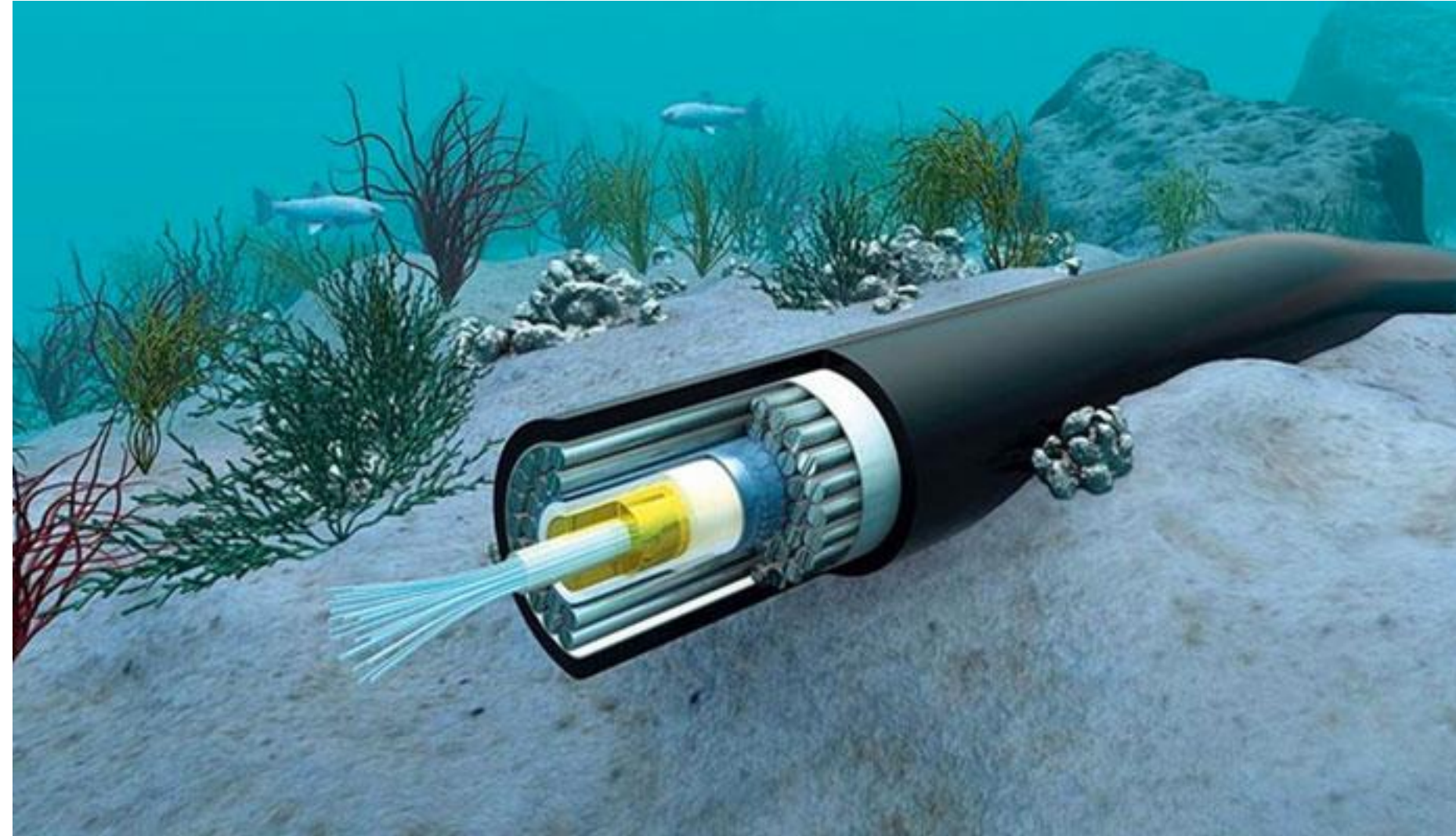
- Pose du Câble :



- Charrue d' «ensouillage» du câble :

Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- Pose du Câble :



- Charrue d' «ensouillage» du câble :

Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- Passage du Câble à terre :



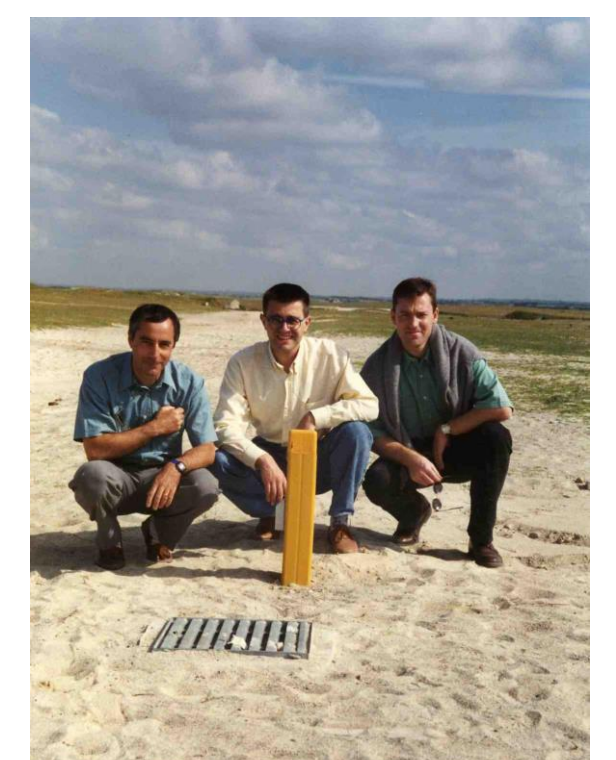
Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- Traversée d'un bras de mer ou Lac : et sur la plage



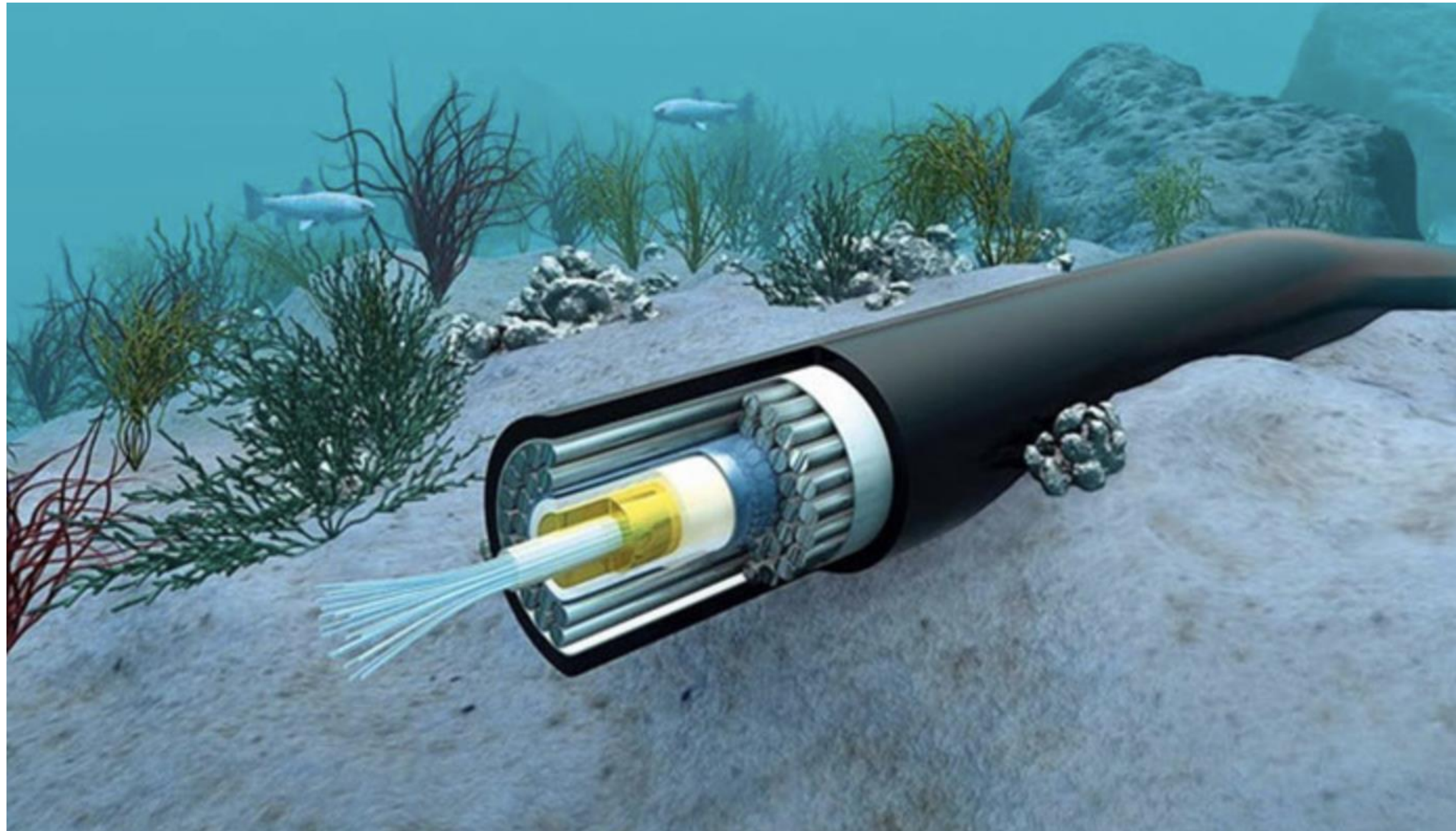
Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- Travail à terre :



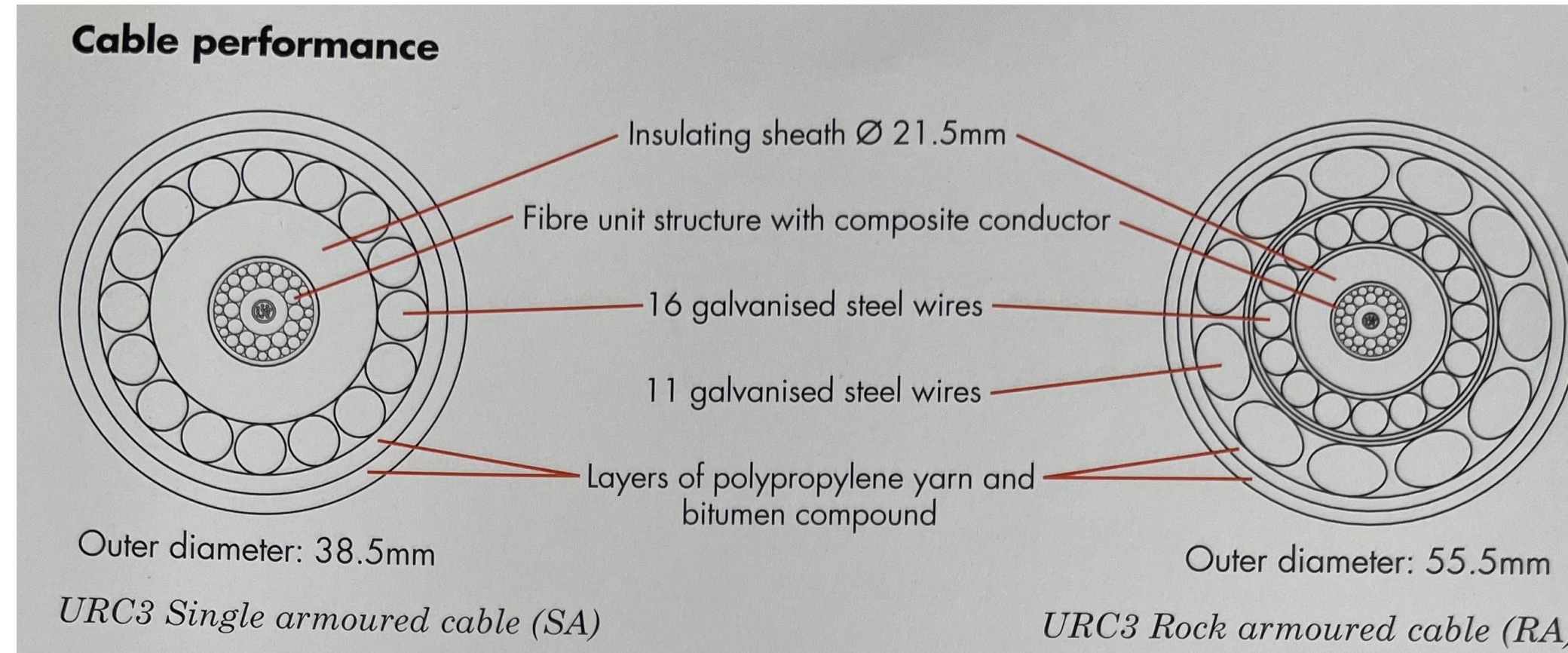
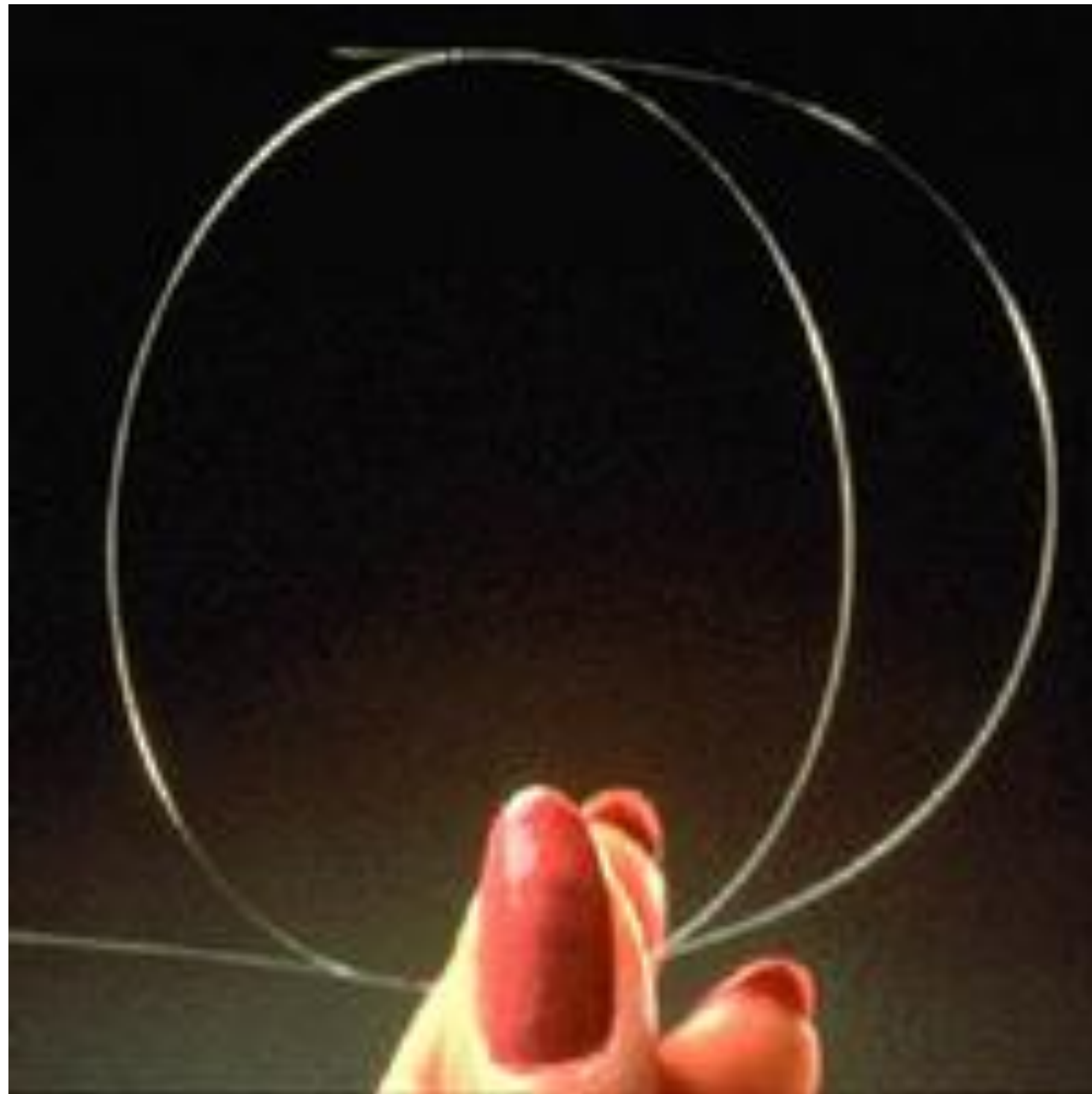
Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- Fabrication du câble , Usine [ASN](#) de Calais :



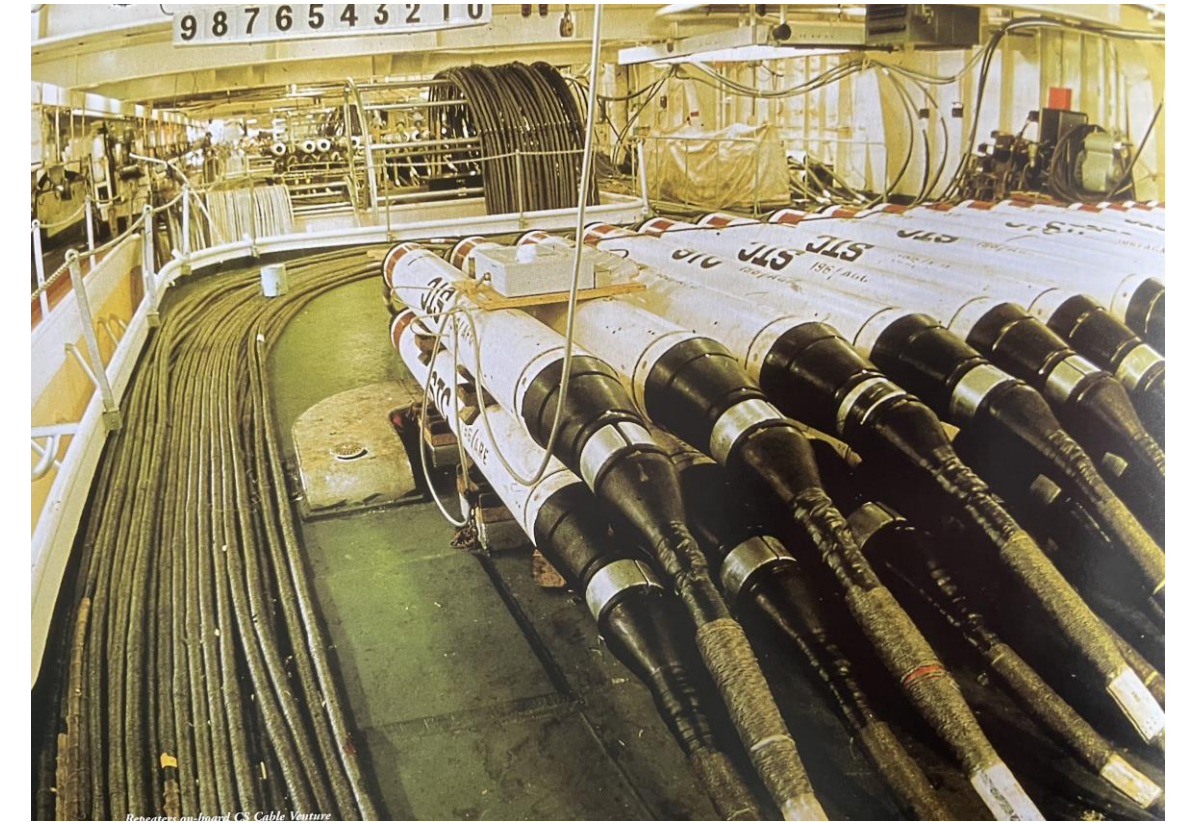
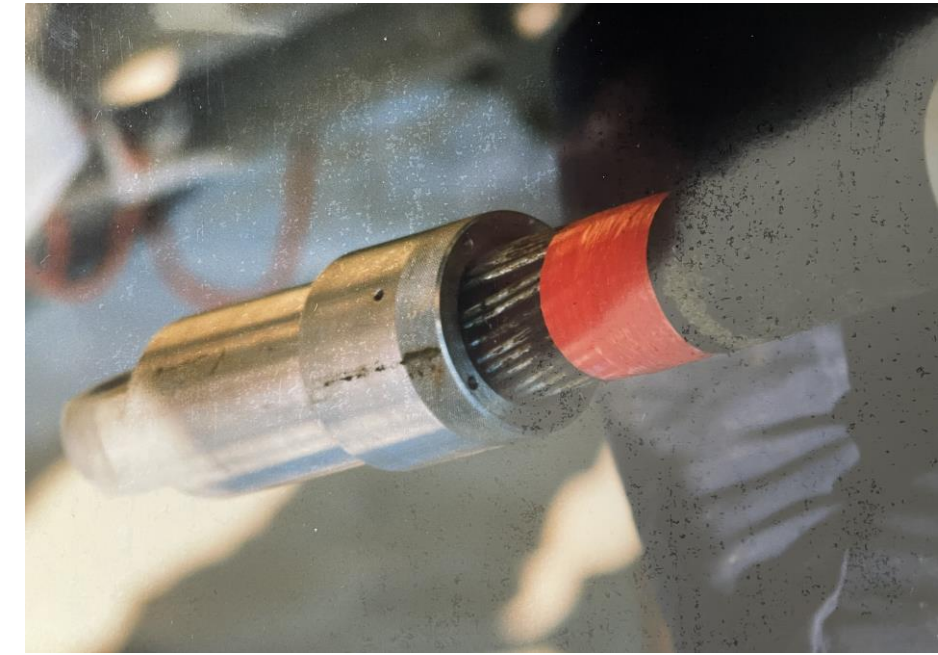
Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- Fabrication du câble , Usine [ASN](#) de Calais : la Fibre -> le Câble



Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- Le câble sert donc de support , de guide à la lumière pour la ,
Transmission des informations .
- Travail du câble sur le bateau :



Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

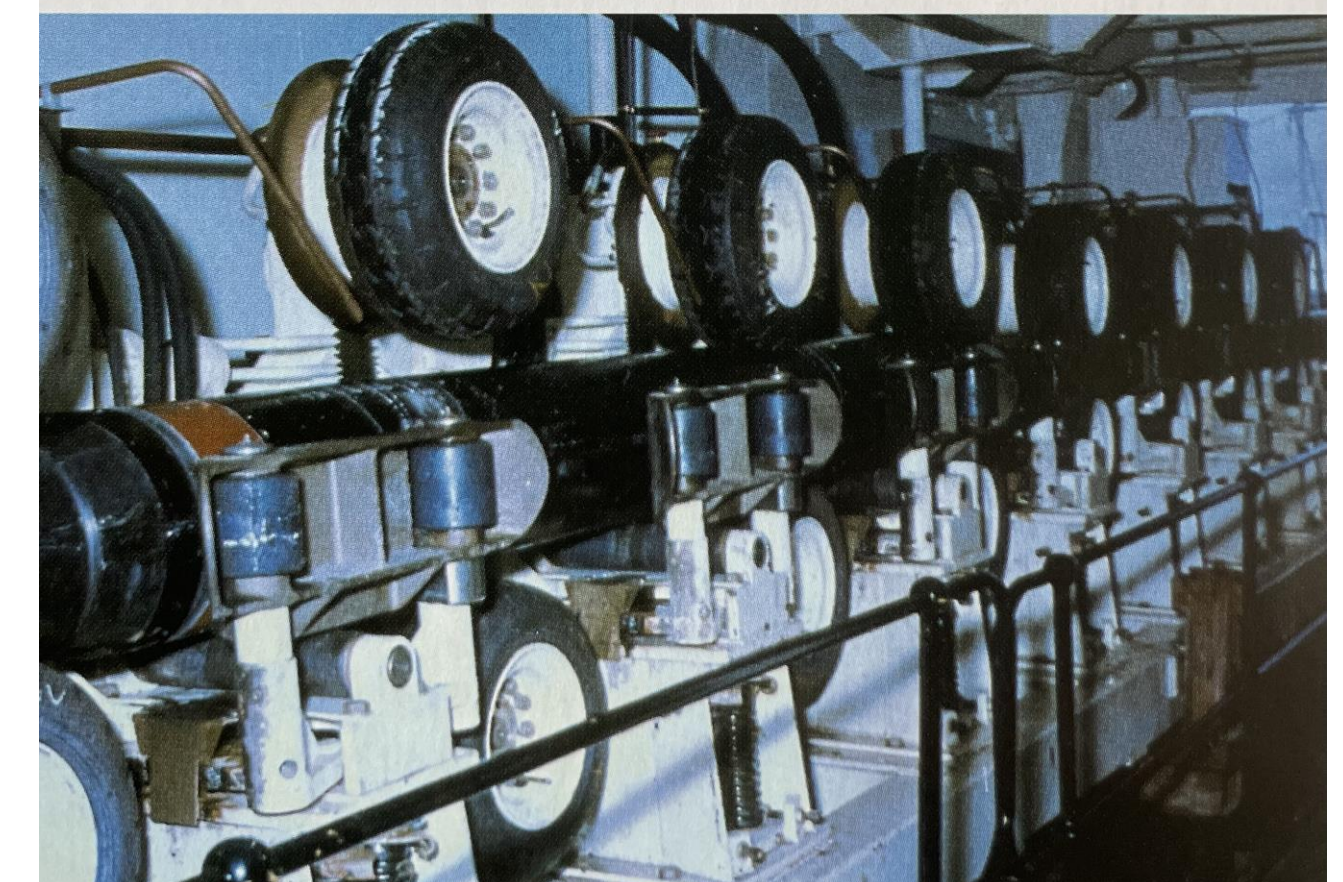
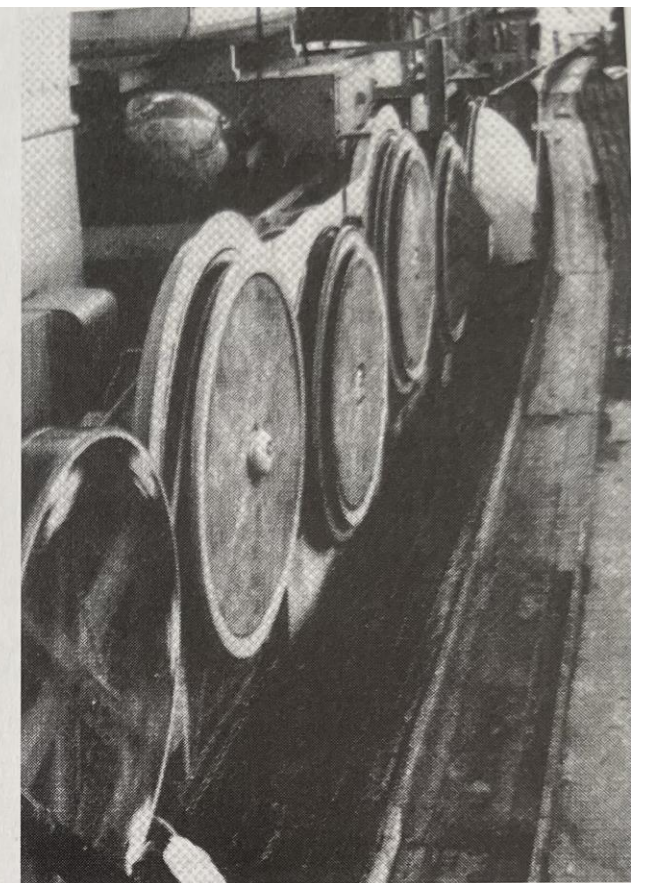
- Travail du câble sur le bateau :

et dans l'Usine



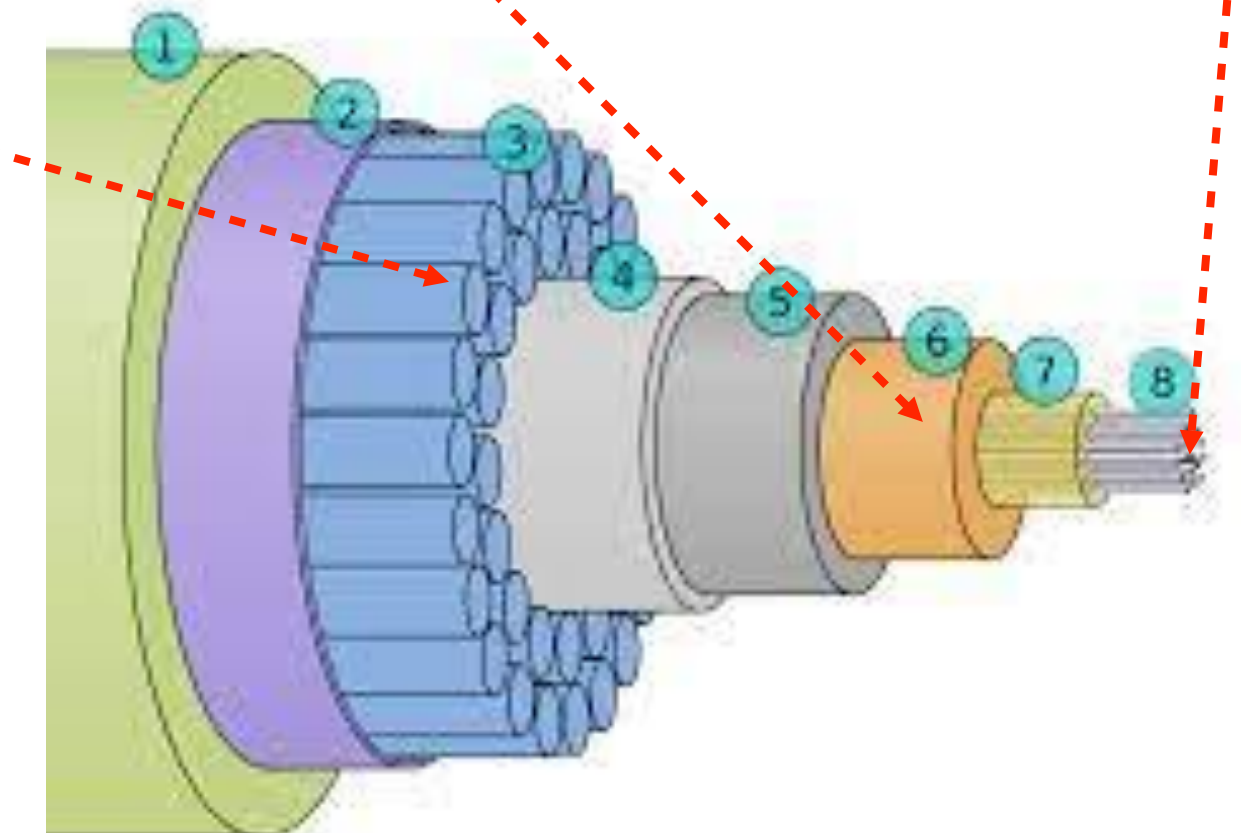
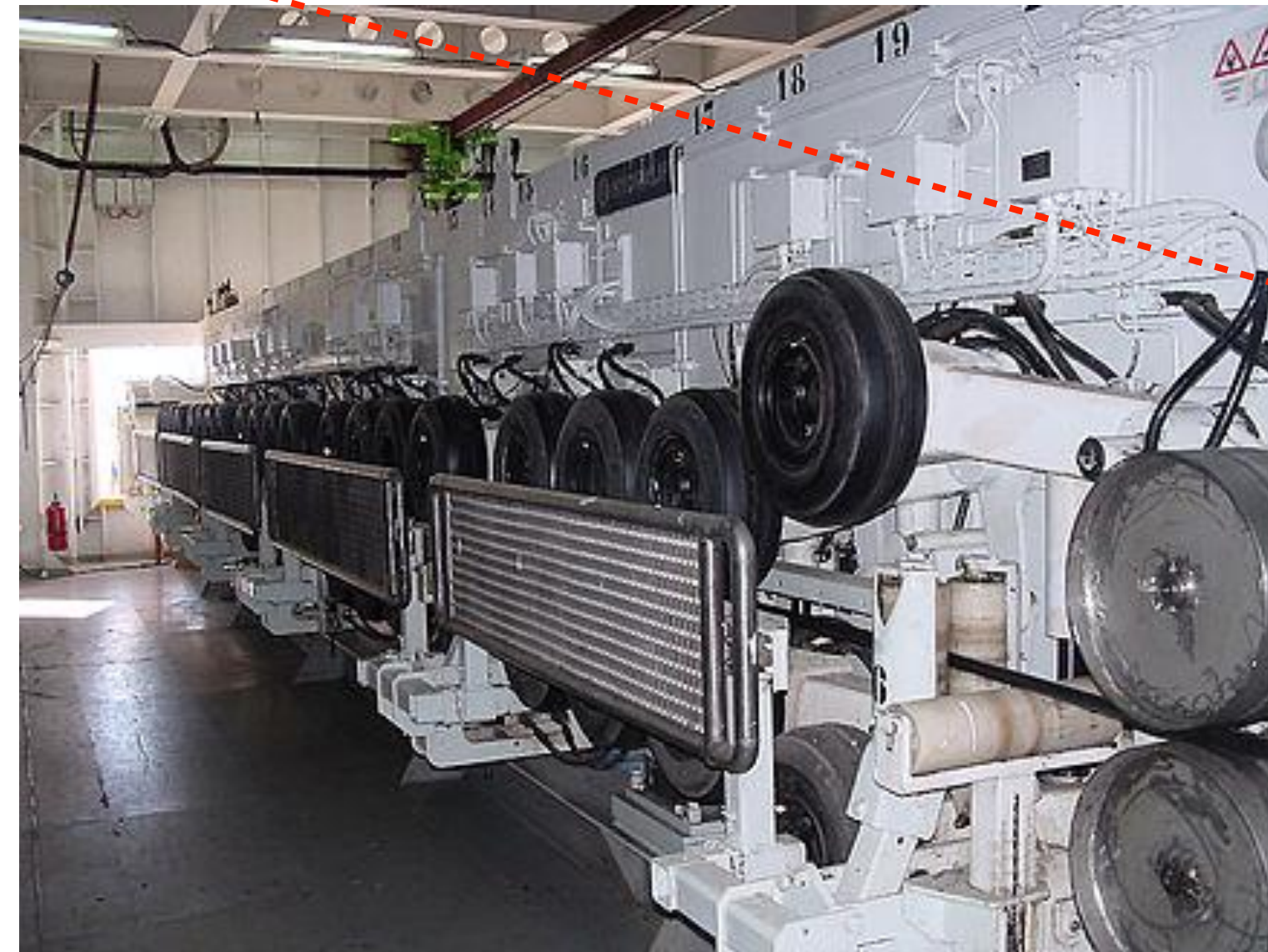
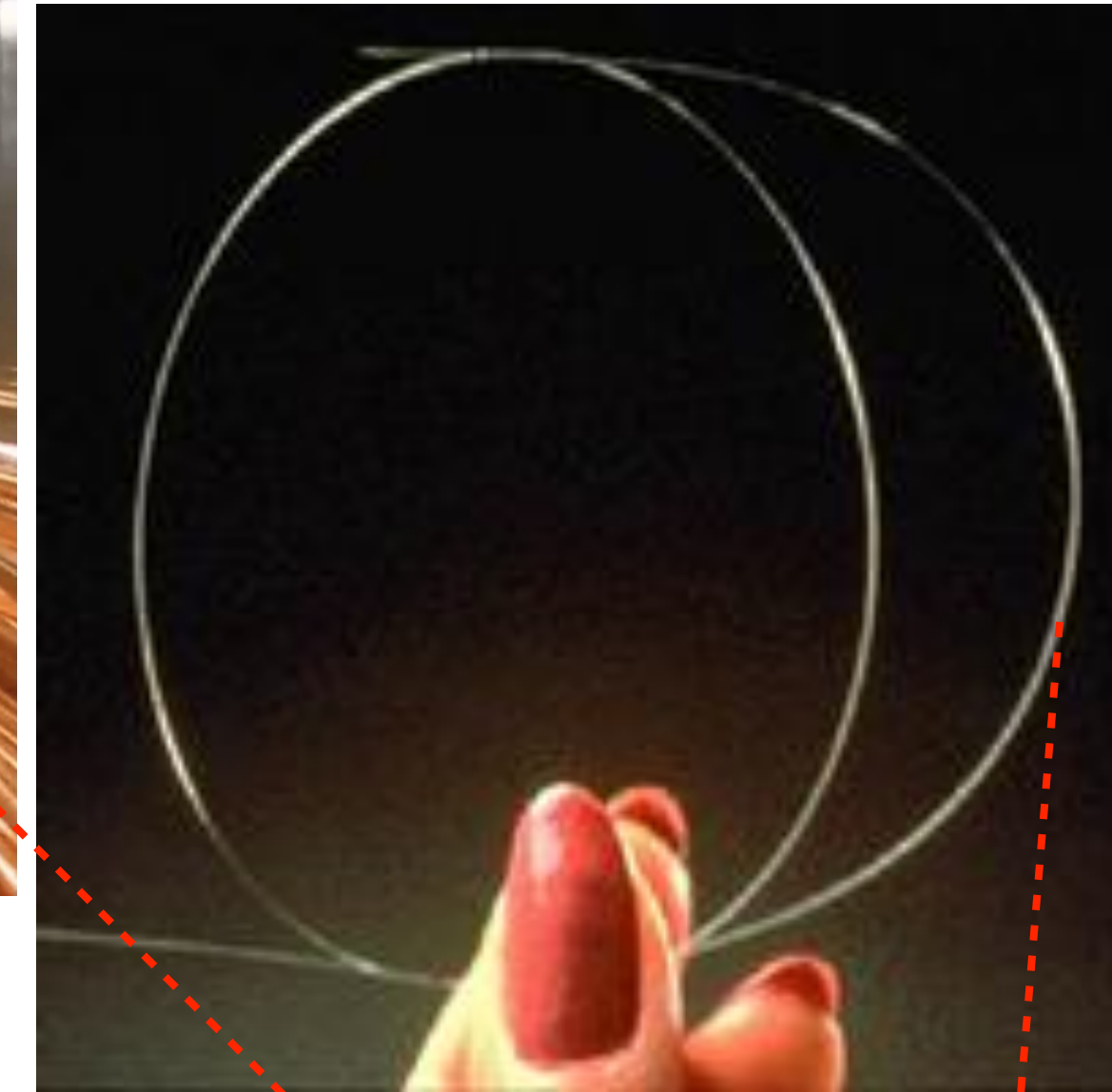
*Right
Five-Sheave cable engine

Below
The original linear cable
engine on Cableship Alert*



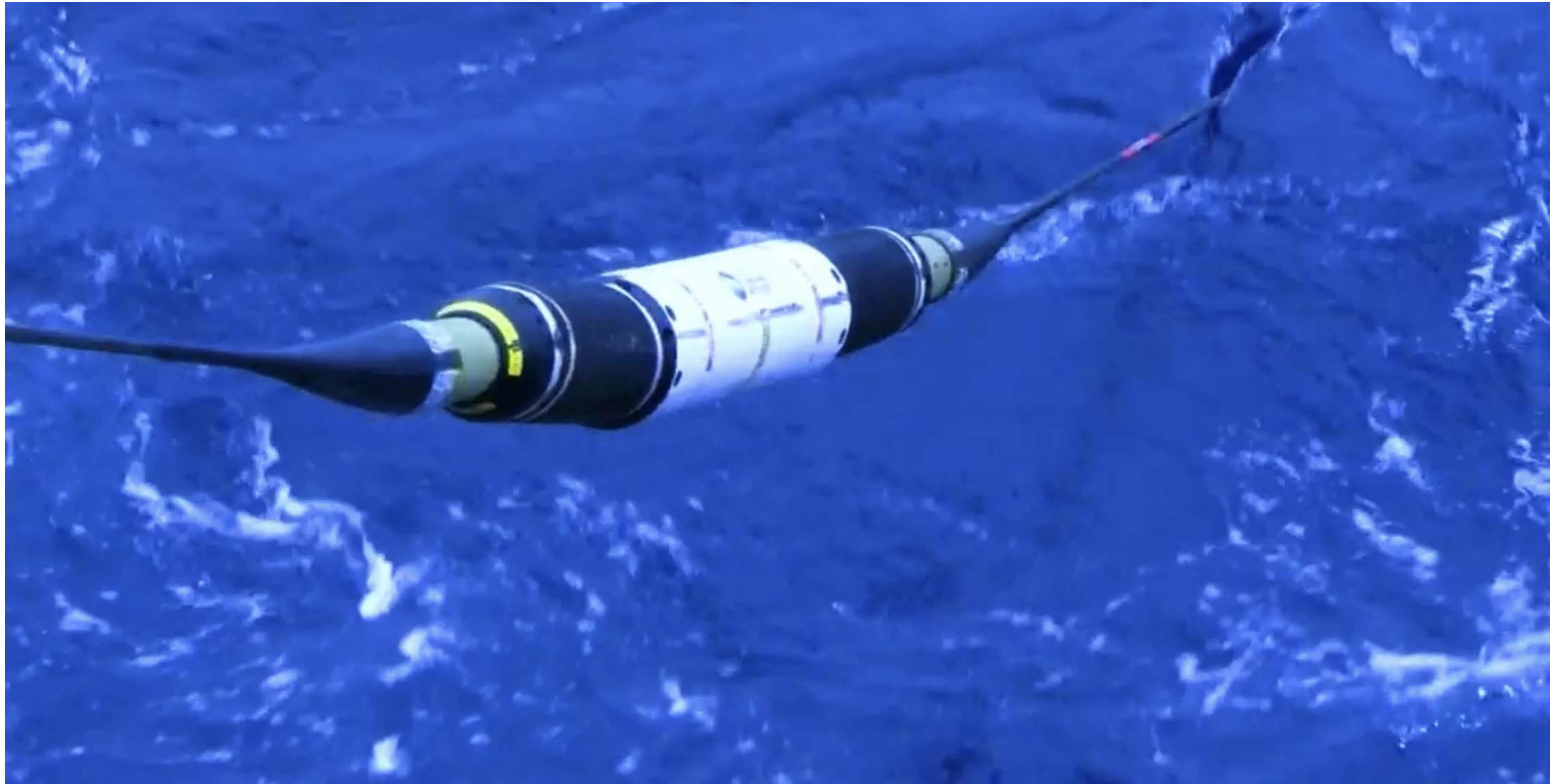
Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- Fabrication du câble : Usine Alcatel Submarine Networks (ASN) de Calais :



Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- Le Répéteur [EDFA](#) ([E](#)rbium [D](#)oped [F](#)iber [E](#)quipment) :



Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- Limite de fonctionnement : **QFactor** :

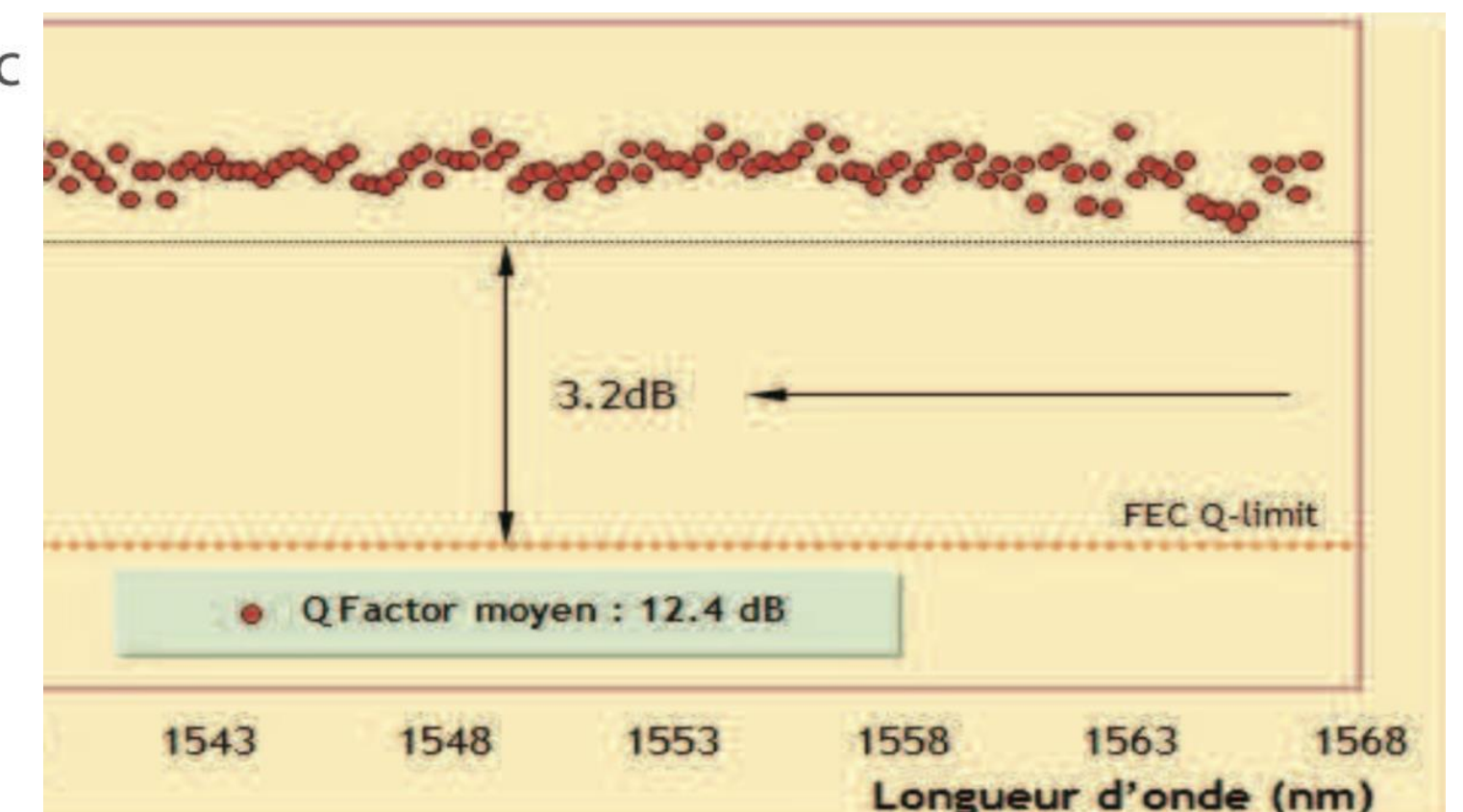
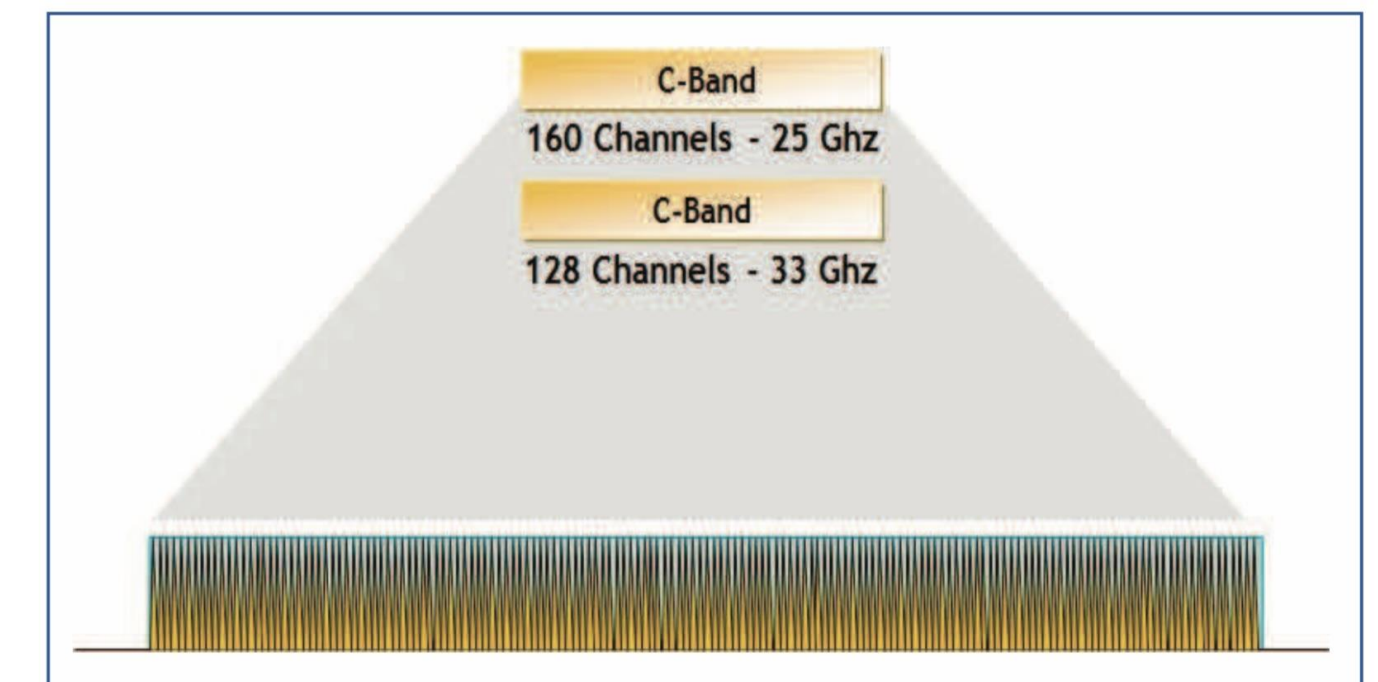
1.1 Rapport signal à bruit d'une liaison WDM (Wavelength Division Multiplexing)

Une liaison sous-marine est constituée d'une cascade de répéteurs espacés de 50 à 100 km suivant les liaisons ; chaque **répéteur** comporte des amplificateurs optiques à fibre dopée à l'erbium (EDFA pour *Erbium Doped Fiber Amplifier*) traversés par une multitude de longueurs d'onde ; la qualité du signal transmis par toutes ces longueurs d'onde doit être absolument la même sur tout le multiplex de transmission, ce qui implique que le gain de chaque EDFA soit identique pour toutes les longueurs d'onde transmises. Afin d'obtenir cette homogénéité spectrale, il est nécessaire d'insérer des filtres optiques égaliseurs de gain en sortie de chaque EDFA permettant ainsi de garantir une distorsion de gain inférieure à 0,2 dB par EDFA sur la bande spectrale utilisée dans les liaisons sous-marines et appelée bande C (1 533 à 1 567 nm). Pour les liaisons très longues, des filtres optiques supplémentaires sont placés périodiquement tous les dix répéteurs environ pour éliminer la distorsion de gain résiduelle. Grâce à cette technique d'égalisation optique, la distorsion de gain cumulée mesurée par exemple sur une distance de 12 380 km (166 EDFA en cascade) est inférieure à 5 dB sur la bande C, soit une distorsion moyenne de 0,03 dB par EDFA (figure 1).

Rappel de la correspondance des espacements en hertz et en nanomètre dans la fenêtre autour de 1 550 nm : $\nu = c/\lambda$ donc $\Delta\nu = - (c/\lambda^2) \Delta\lambda$, ce qui donne $\Delta\nu = 33$ GHz pour $\Delta\lambda = 0,27$ nm.

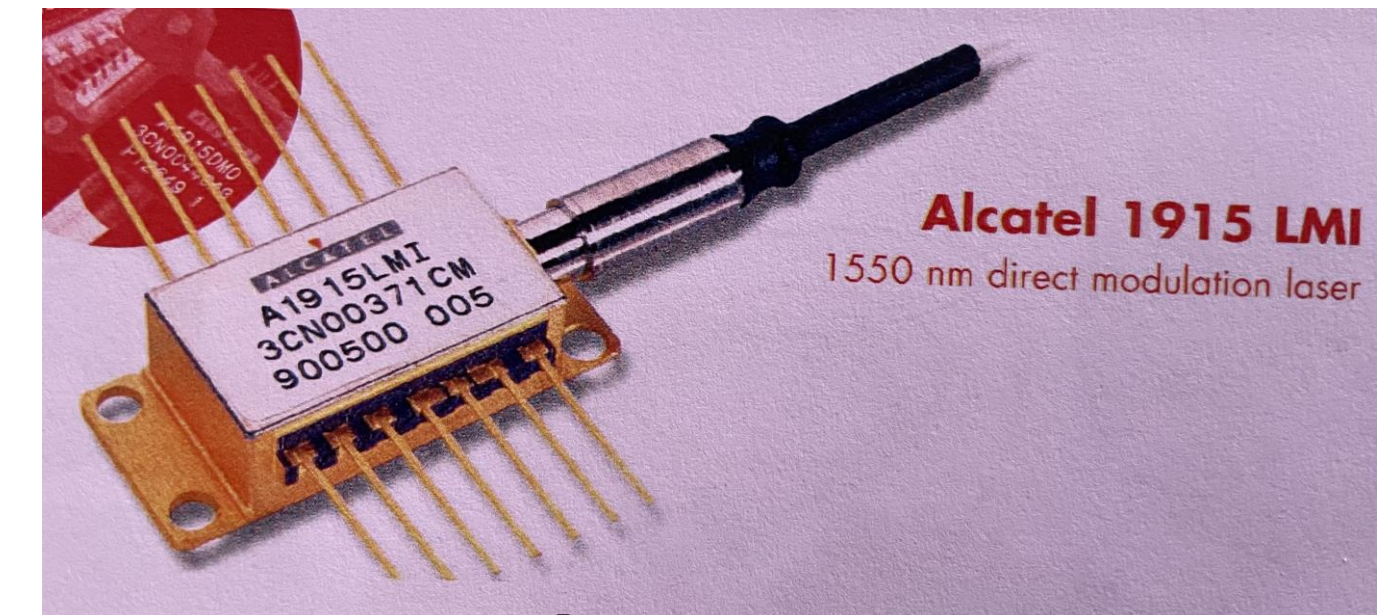
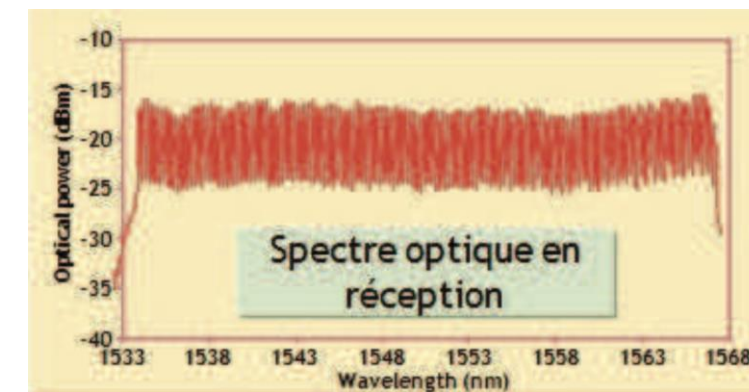
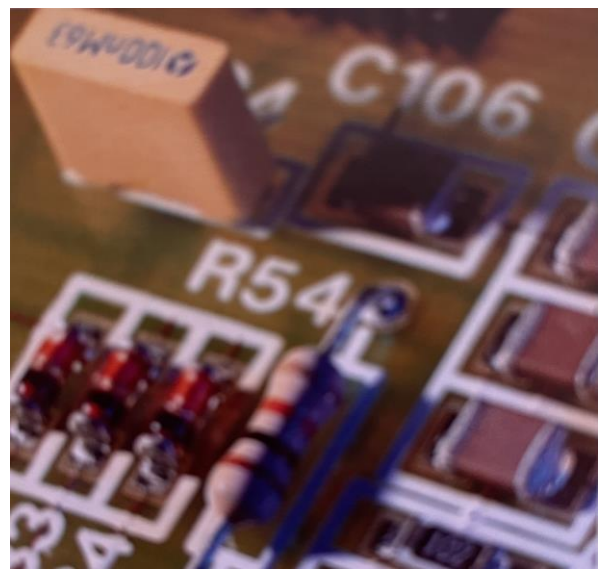
- **QFactor** (Facteur de Qualité Transmission) , rapport Signal à Bruit (en dB) , limite où l'on ne peut plus décider de façon fiable si les Data sont des 0 ou des 1 , malgré les FEC (Détecteur d'Erreurs)

La capacité transportée par une fibre optique est ainsi le nombre de canaux qui est le rapport de la bande passante disponible sur l'espace spectral entre canaux.
La limitation physique de la capacité ultime sur une ligne sous marine est donnée par les qualités de la ligne elle-même: performances OSNR (rapport signal à bruit), type de fibres, et bien entendu la performance des transpondeurs eux-mêmes.



Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

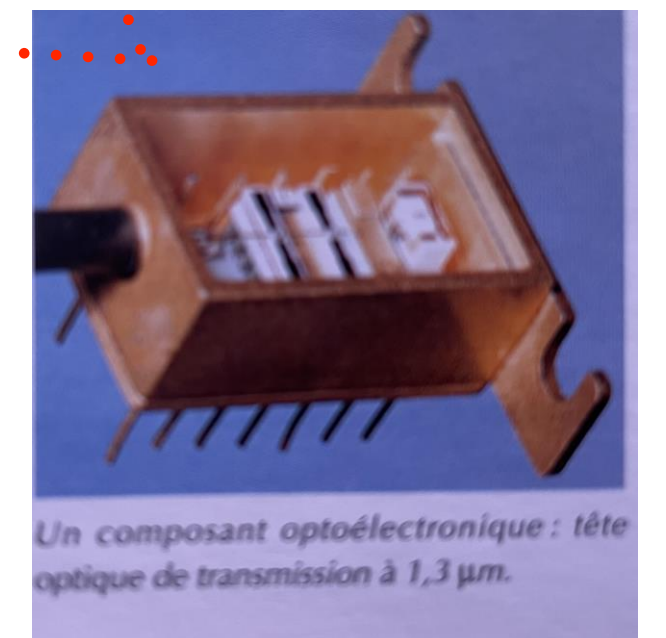
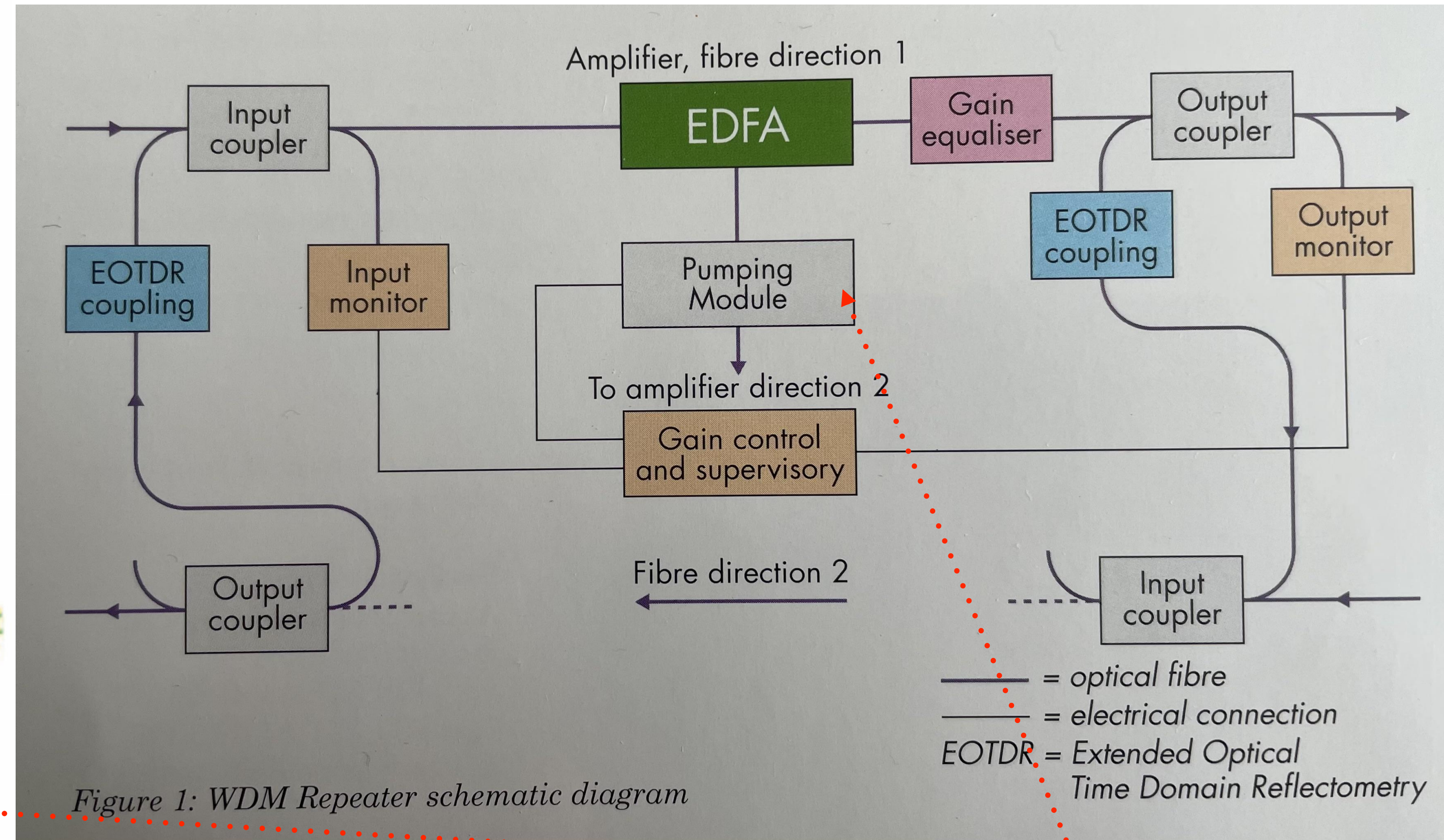
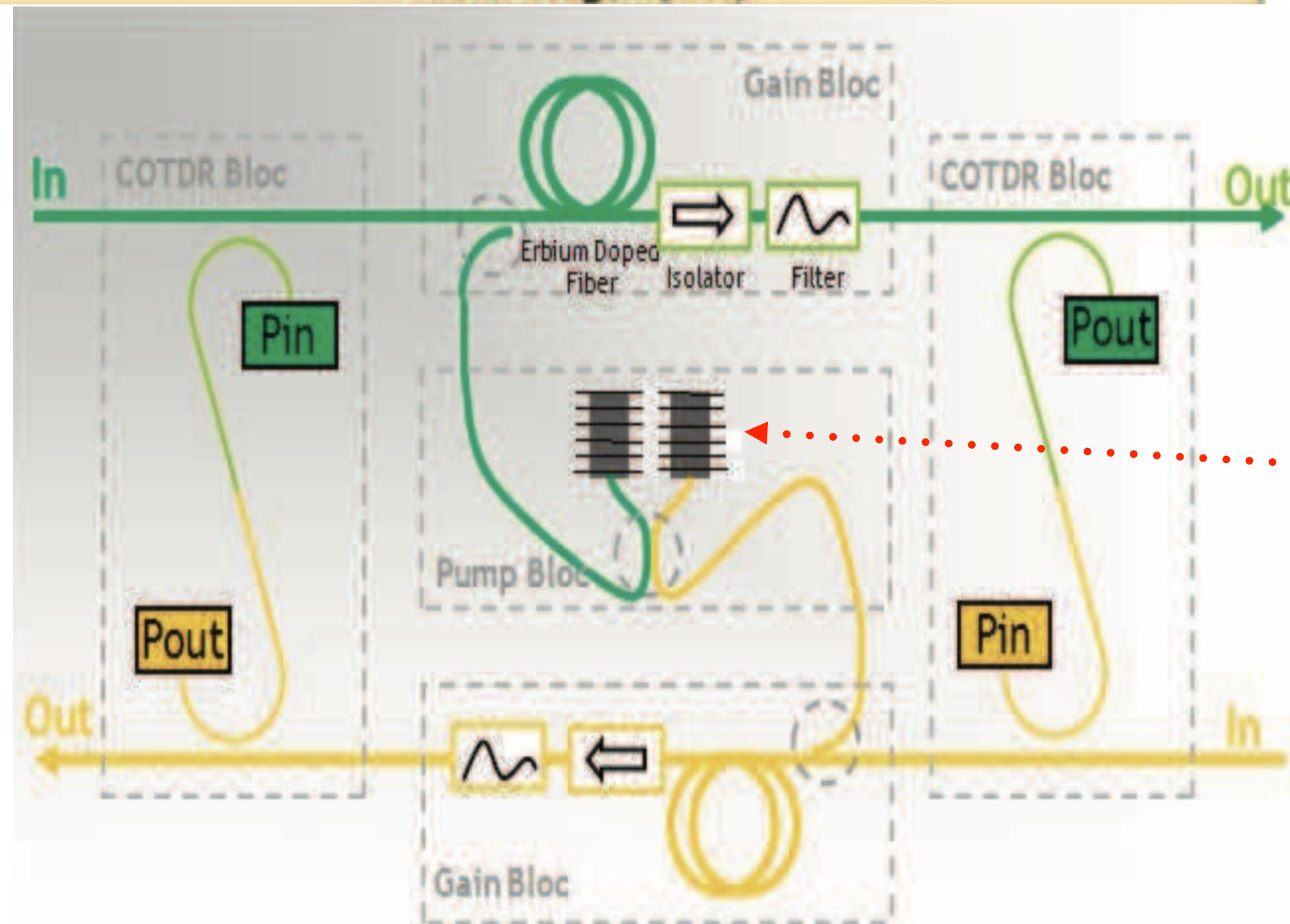
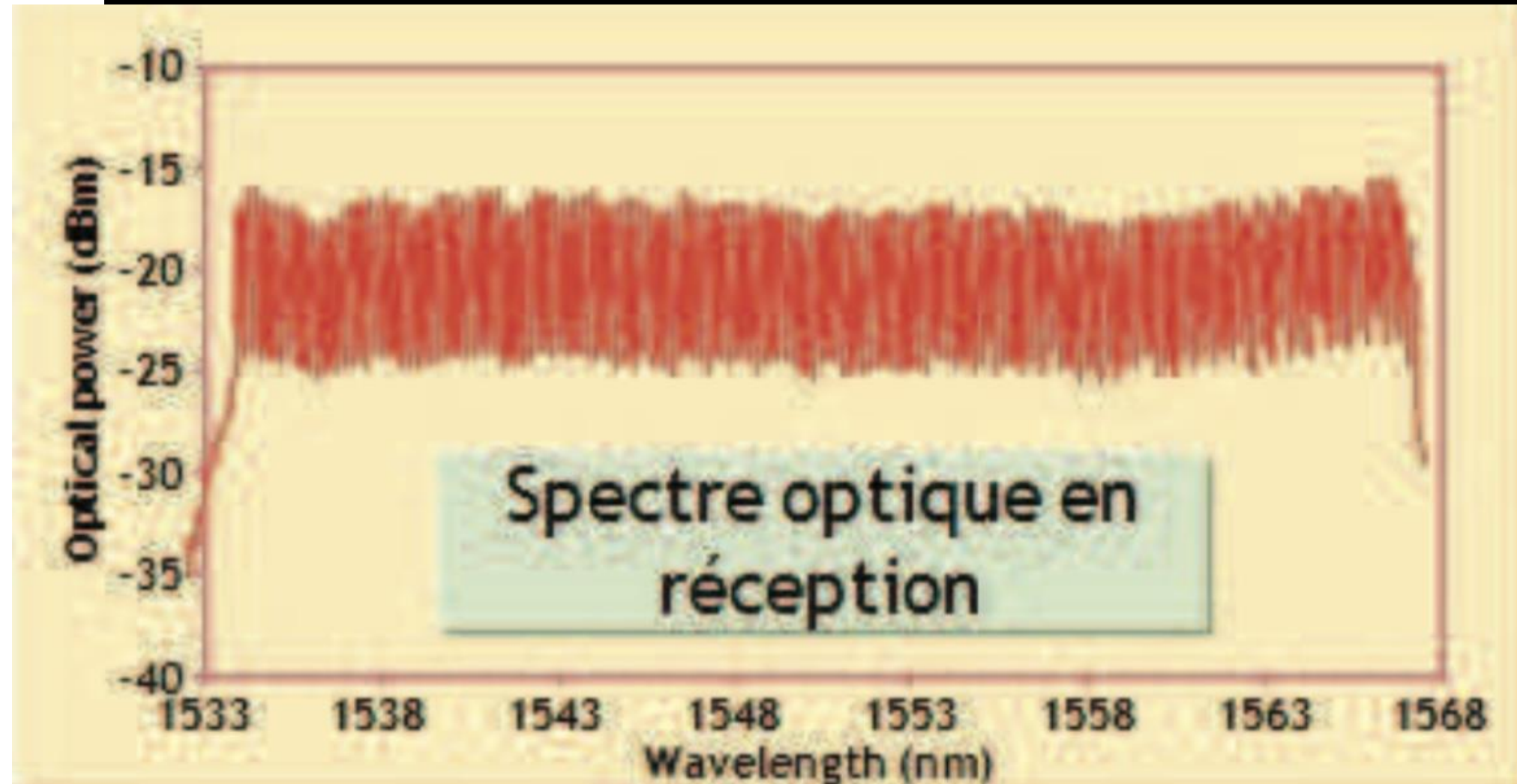
- Tout au long du câble , le signal lumineux composé des X (on a vu précédemment que X peut aller jusqu'à 220/230 ...) longueurs d'Ondes s'affaiblit (pertes optiques dans la Fibre) et se déforme (différences de vitesse de propagation des différentes longueurs d'ondes) . Il est perturbé par le bruit optique , généré par les photons et électrique des composants , généré par l'agitation des électrons .



- Le signal lumineux transmis doit donc être ré-amplifié/régénéré , (tous les # 100 à kms selon la liaison) et ré-injecté dans la fibre .
- C'est le rôle du Répéteur **EDFA** (Erbium Doped Fiber Amplifier) .
- Il est composé de différents étages répondant à des fonctions précises pour la partie optique et pour la partie électrique/électronique :

Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- Synoptique partie optique du Répéteur **EDFA** (**E**rbium **D**oped **F**iber **A**mplifier):



Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

• Principe de fonctionnement du Répéteur **EDFA** (Erbium Doped Fiber Amplifier):

La révolution de l'amplification optique

La révolution optique que nous allons commenter plus avant ici est celle de l'amplificateur optique.

L'amplificateur optique a été objet de recherches pour les applications des télécommunications pendant de nombreuses années, recherche qui s'est accélérée dans la fin des années 1990 avec la compétition entre trois technologies pour les applications sur fibres optiques : l'amplification à semi-conducteurs où le milieu amplificateur est un laser à semi-conducteur, l'amplification Raman qui repose sur l'effet Raman stimulé, et l'amplification à terres rares. La technologie qui a emporté sans contestation la bataille technologique est l'amplification à fibre dopée Erbium.

Le schéma de l'amplificateur optique à fibre dopée Erbium est illustré dans la figure 1. Le dispositif à fibre dopée à la terre rare Erbium amplifie par effet laser les signaux optiques dans la troisième fenêtre des télécommunications optiques autour de 1,5 micromètres de longueur d'onde qui se trouve par un heureux hasard être la fenêtre de plus faible perte optique de la silice des fibres optiques.

Ce dispositif d'amplification est d'autant plus simple que l'amplification peut être obtenue par le pompage à l'aide de lasers à semi-conducteurs qui associent leur faible consommation électrique et leur grande fiabilité, ce qui a été fondamental pour le développement des câbles optiques sous-marins. Cette combinaison magique s'accompagne d'un clin d'œil à la physique en étant un laser à trois niveaux, type de laser qui a été abandonné dans les applications classiques. Un ouvrage de référence sur l'amplification optique à fibre dopée Erbium est écrit par Emmanuel Desurvire, co-inventeur de l'amplificateur optique à fibre dopée Erbium (3).

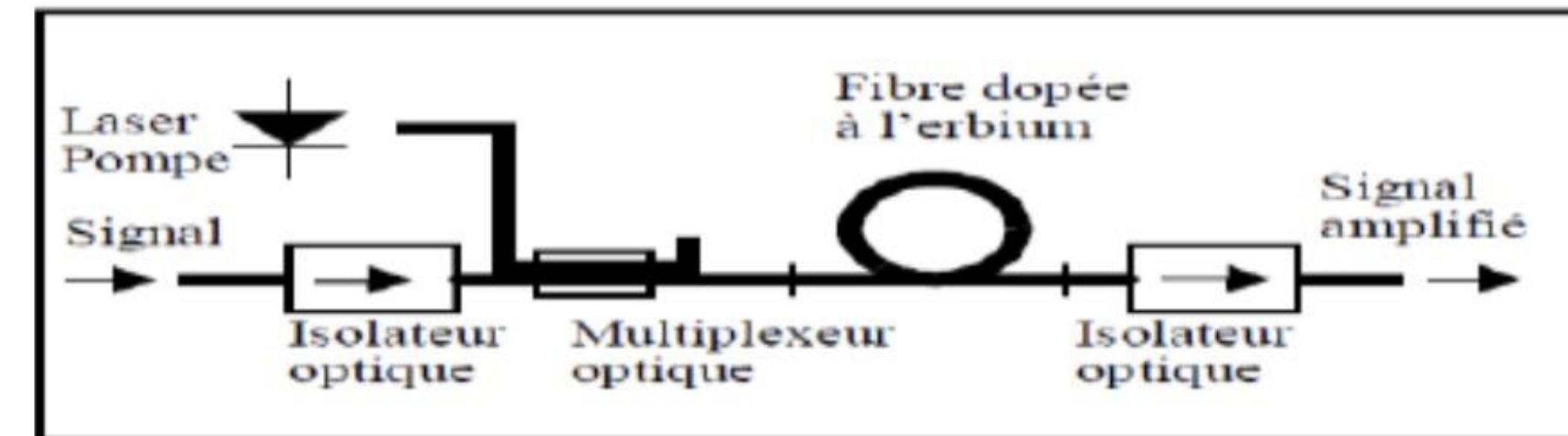
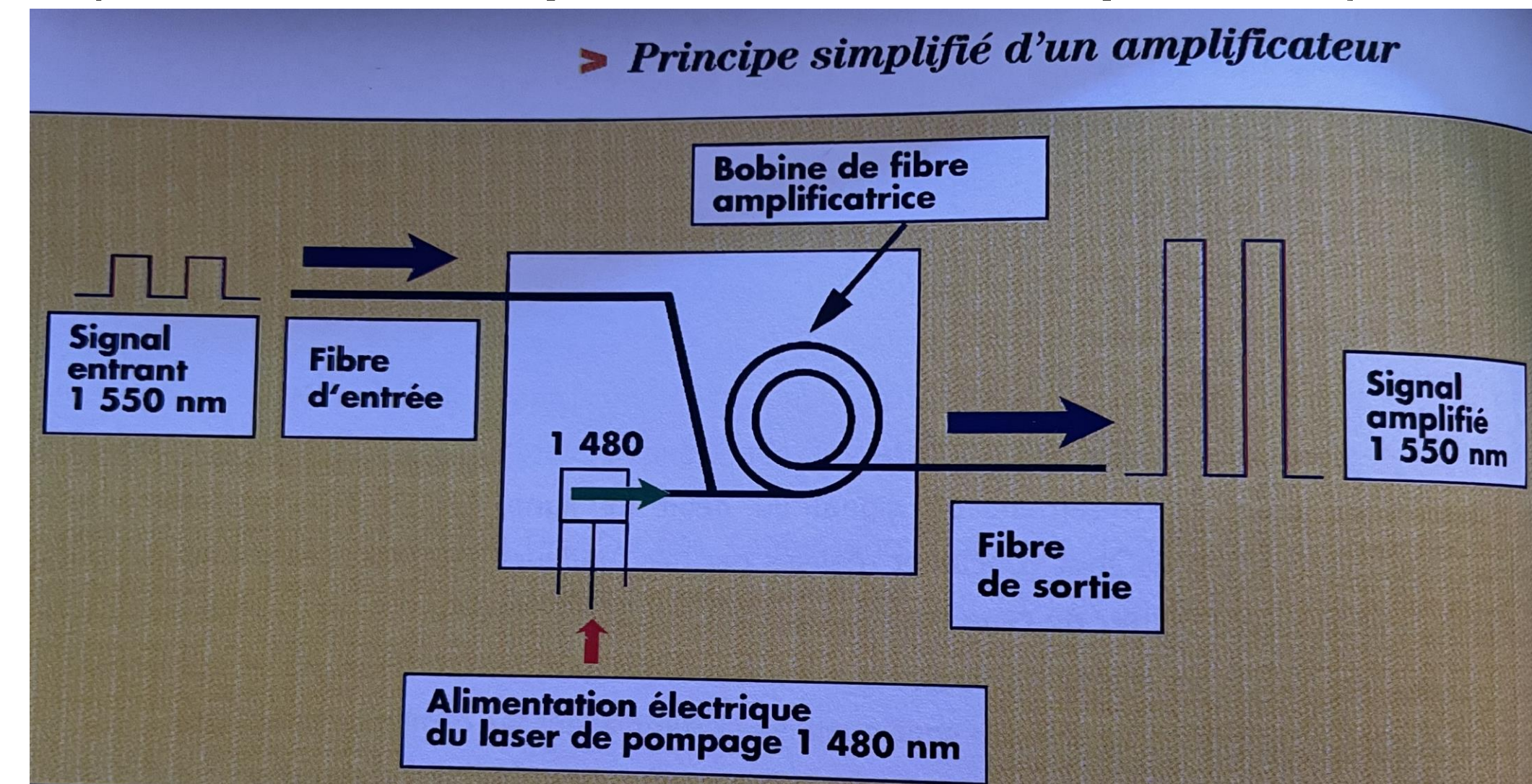


Figure 1 : Principe de fonctionnement d'un EDFA.

- **Rappel** : Gain $G = P_S / P_E$, en dB = $10 \log G$; Si $G = 10$, en dB : $G = 10 \text{ dB}$ // si $G = 100$, en dB : $G = 20 \text{ dB}$ // si $G = 1000$, en dB : $G = 30 \dots$
- dBm : puissance en dB par rapport à une valeur référence de 1mW

Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- Partie Optique :
- L'étage d'entrée , comportant 1 coupleur optique d'entrée , qui va séparer le signal en 2 flux :
 - le premier qui sera réinjecté en ligne après Amplification ,
 - le second qui sera injecté vers le second Laser Pompe de secours L'isolateur optique , qui va bloquer les réflexions (retours) optiques dans le sens opposé .
- Le coupleur optique est constitué de 2 fibres optiques dont les coeurs sont fusionnés (un peu comme un greffe ...)
- L'isolateur optique , empêchant les réflexions (retours) d'une partie du signal , l'isolateur se comporte comme une diode , mais en optique

Grandeur réelle



Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- Partie Optique :
- L'étage d'Amplification , comportant 1 Laser Pompe et un rouleau (8 à 15 mètres) de Fibre dopée Erbium :
 - le Laser pompe va injecter dans la Fibre erbium , une porteuse optique à 1 longueur d'onde (λ) comprise entre 1533 nm et 1567 nm , avec une forte Puissance (+17 dBm) .
 - Sous l'effet de cette puissance la fibre va émettre des photons et amplifier le signal optique reçu .
 - Un isolateur et 1 coupleur de sortie permettent le raccordement à la sortie du **Répéteur EDFA** .

Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- Caractéristiques moyennes de l' Amplificateur EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier):

Le répéteur peut contenir jusqu'à 8 paires d'EDFA dont les caractéristiques optiques principales sont les suivantes :

- la puissance totale optique de sortie : jusqu'à + 17 dBm ;
- le gain maximum : 23 dB ;
- le facteur de bruit : 5 dB ;
- PDL : < 0,3 dB ;
- PMD : < 0,3 ps/nm ;
- la variation spectrale du gain sur la bande d'amplification en présence de filtres égaliseurs de gain : < 0,1 dB.

L'alimentation d'une paire d'EDFA est effectuée par prélèvement d'une tension de 7,2 V au moyen d'une diode Zehner. Les paires d'EDFA sont placées en série et sont alimentées par un courant continu de 1 A réparti comme suit :

- **Rappel** : Gain $G=PS/PE$, en dB = $10\log G$; Si $G=10$, en dB : $G=10\text{dB}$ // si $G=100$, en dB : $G=20\text{dB}$ // si $G=1000$, en dB : $G=30$
- dBm : puissance en dB par rapport à une valeur référence de 1mW

Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

La partie électrique / électronique comporte :

Un circuit de Télésurveillance , chargé de donner aux Stations terrestres des information sur le fonctionnement , .

Un circuit de décision et de Régulation de la Puissance de sortie (via le Laser Pompe) , un circuit de Décision , et un circuit de Synchronisation , pilotant le circuit de Décision .

Le Répéteur est télé-alimenté en courant continu (#1 Ampère , prélèvement par Diode Zener , # 7,2Volts)) , par 1 ou 2 (selon la longueur de la liaison) Télé-alimentation (s) de 15000 Volts , située (s) dans chaque Station Terrestre .

Il est protégé des sur-tensions créées par d'éventuelles coupures de câble par des parafoudres .

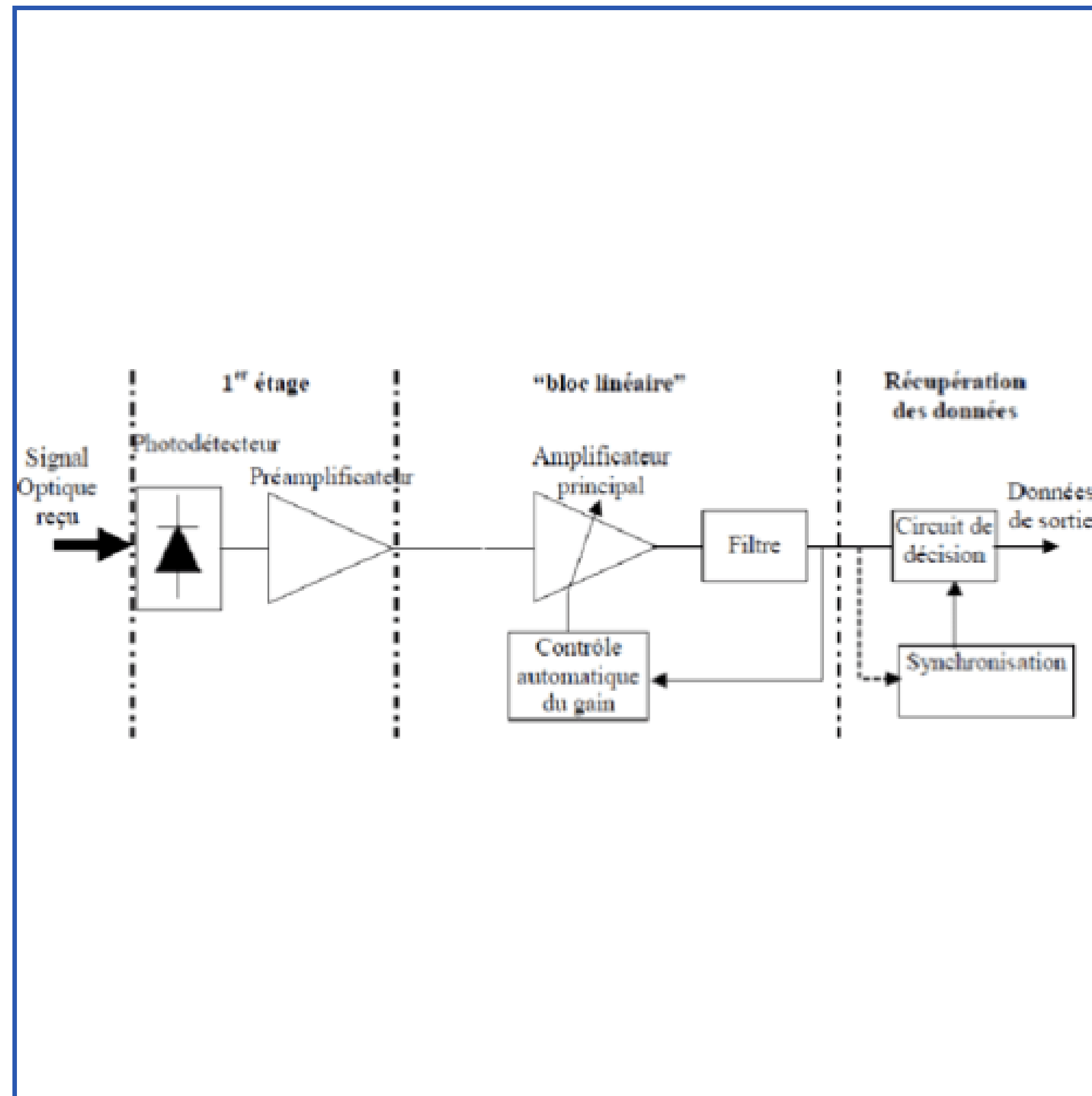
L'ensemble des circuits électroniques est enfermé dans un cylindre étanche supportant la pression des fonds marins . Ce cylindre assure également les liaisons (à chaque extrémité) avec le câble , l'étanchéité de ces liaisons , (jusqu'à - 6000 mètres) , ainsi que les contraintes mécaniques liées à la pose (tractions sur le câble) .

Le Répéteur a une durée de vie garantie de 25 ans (Garantie Constructeur !) , 2,5 fois plus qu'un Satellite .

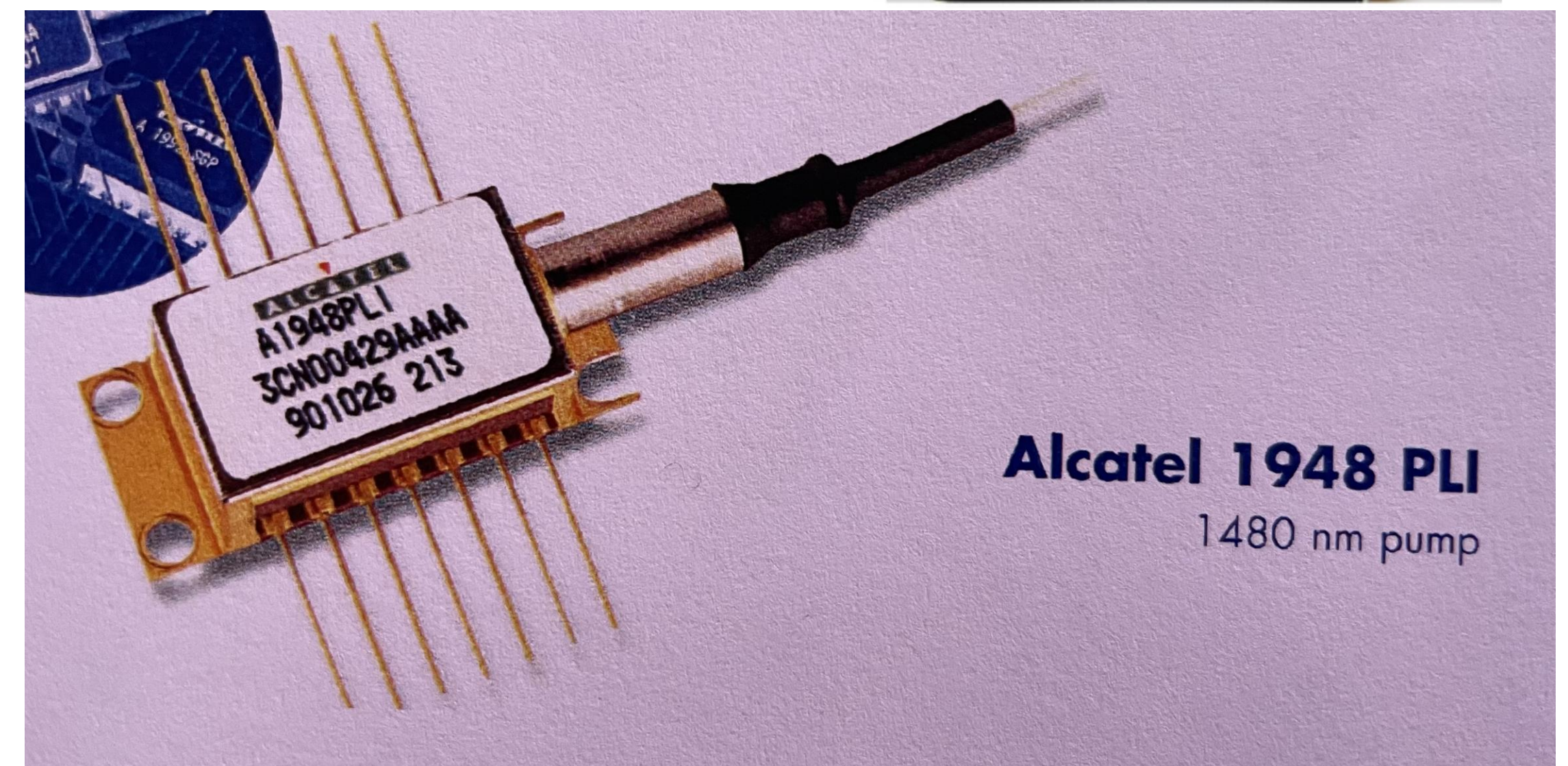
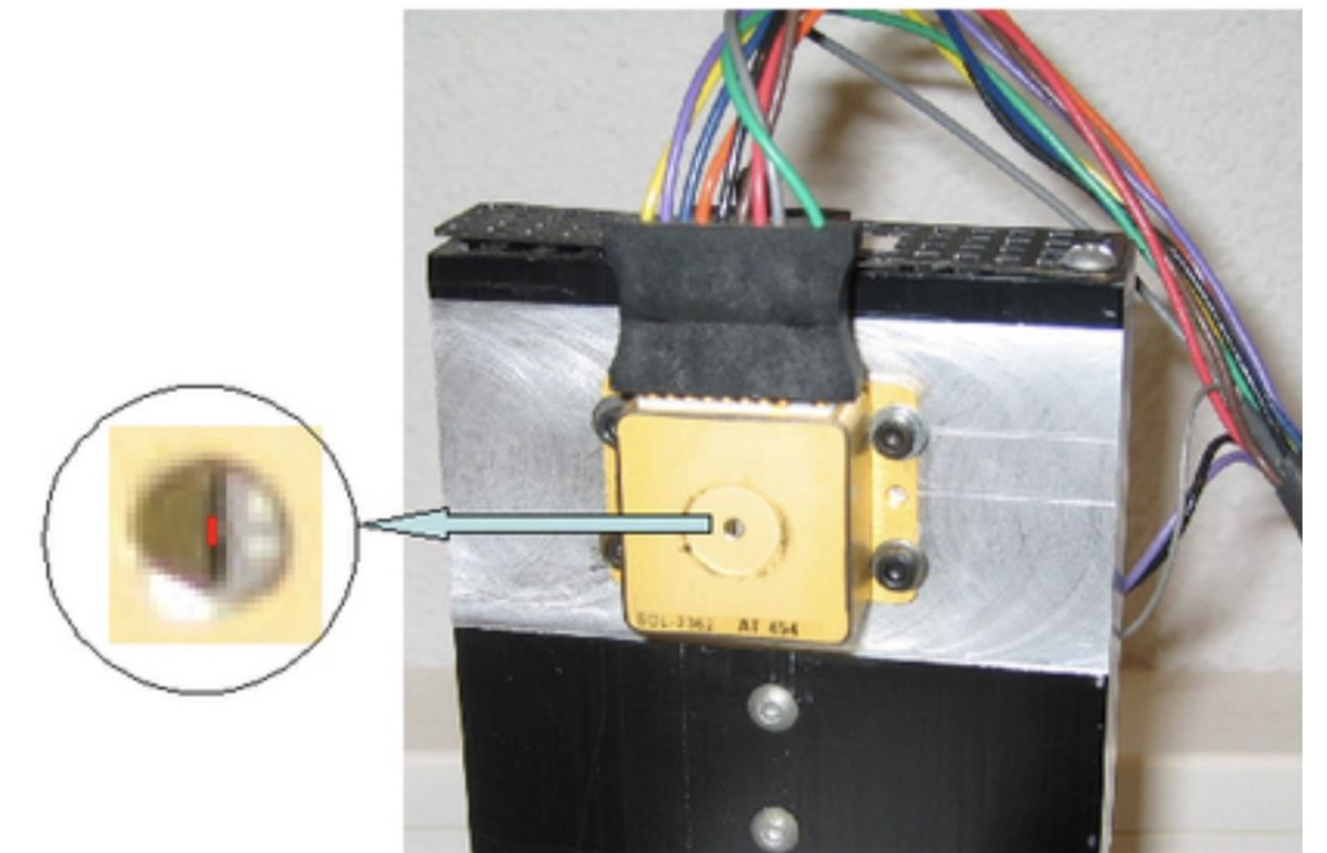
A proximité des côtes , il est « ensouillé » , c'est à dire enfoui dans les fonds marins , pour éviter d'être détérioré par les chalutiers .

Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- Synoptique fonctionnel du Répéteur Sous-Marin EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) :

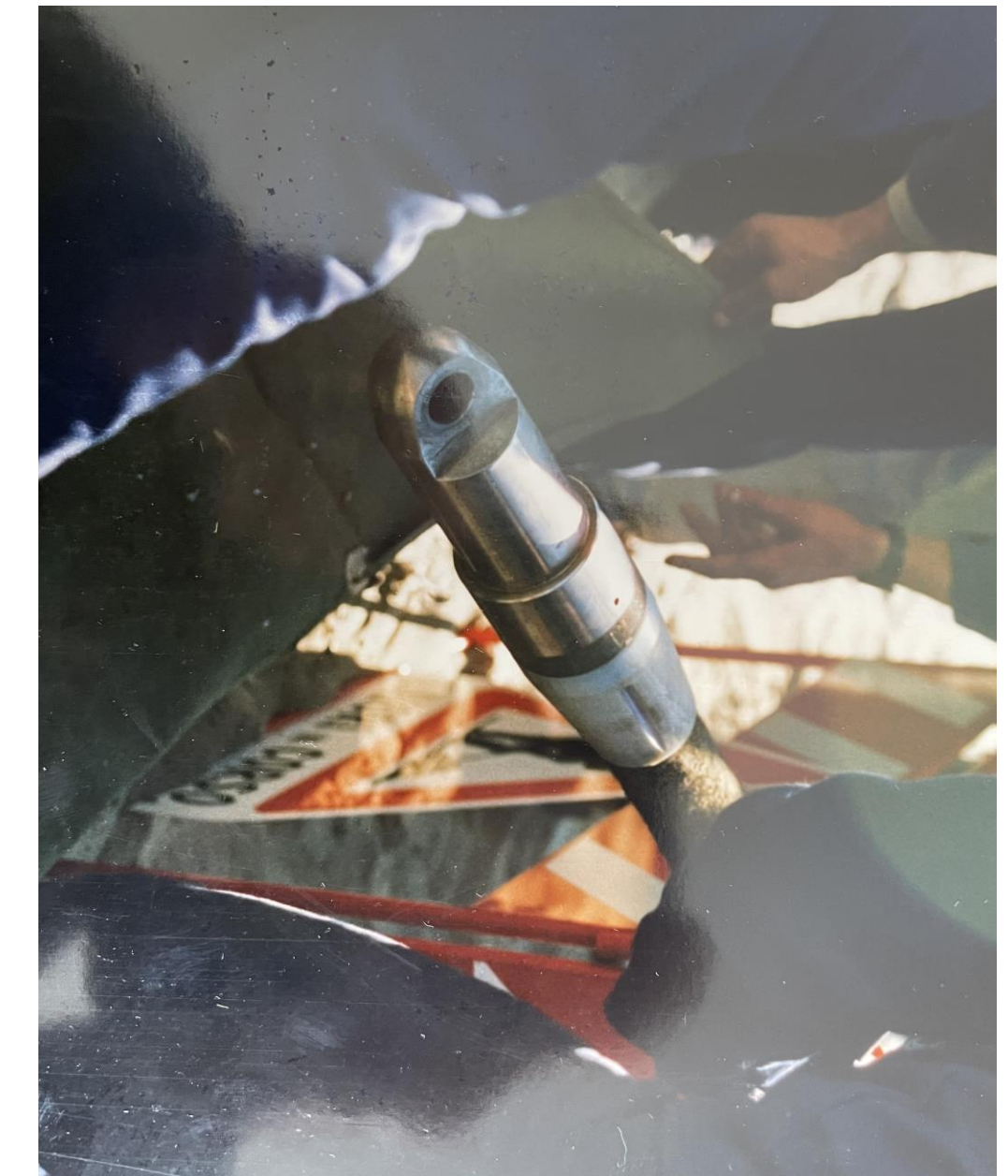


- Laser Pompe :



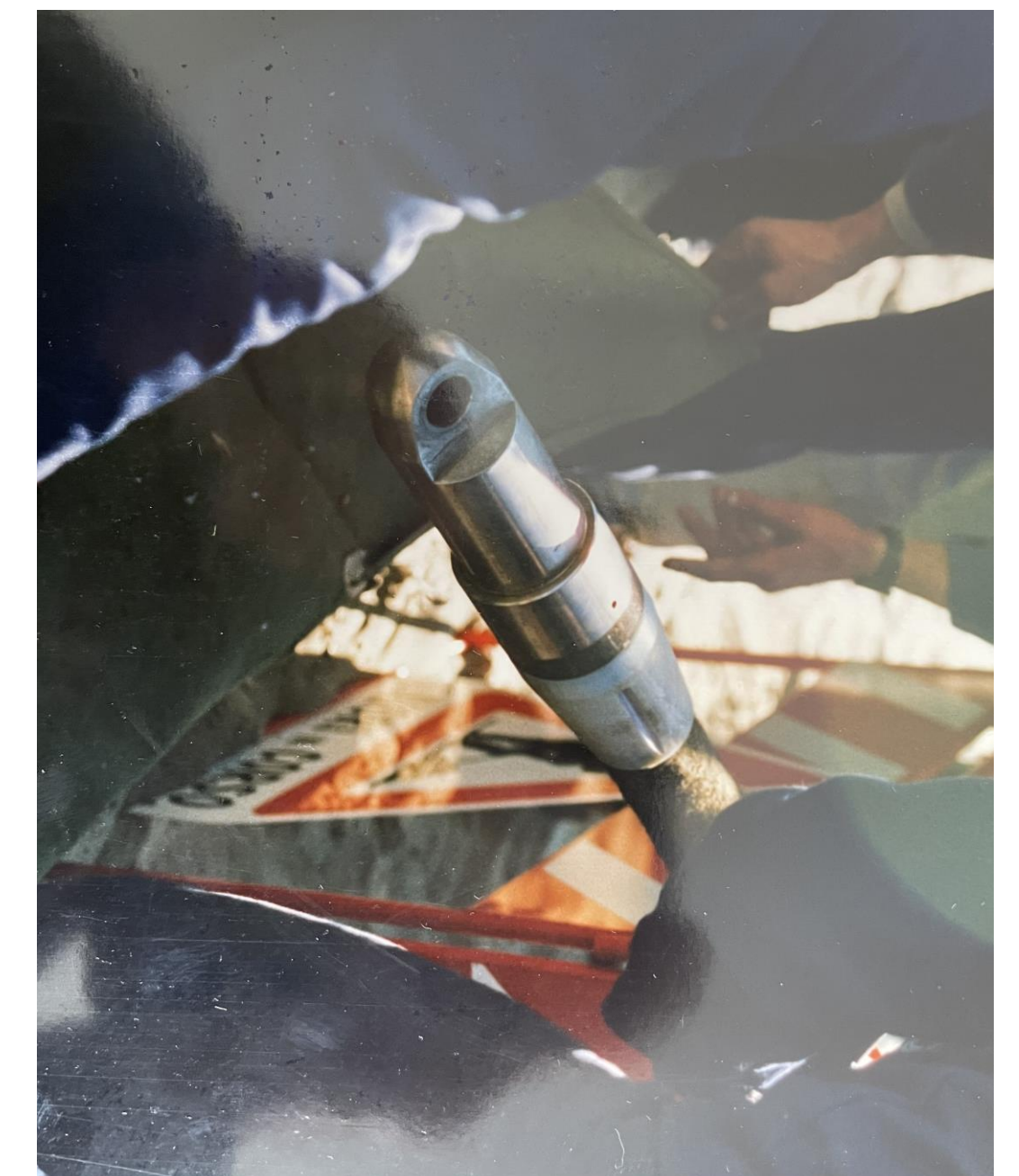
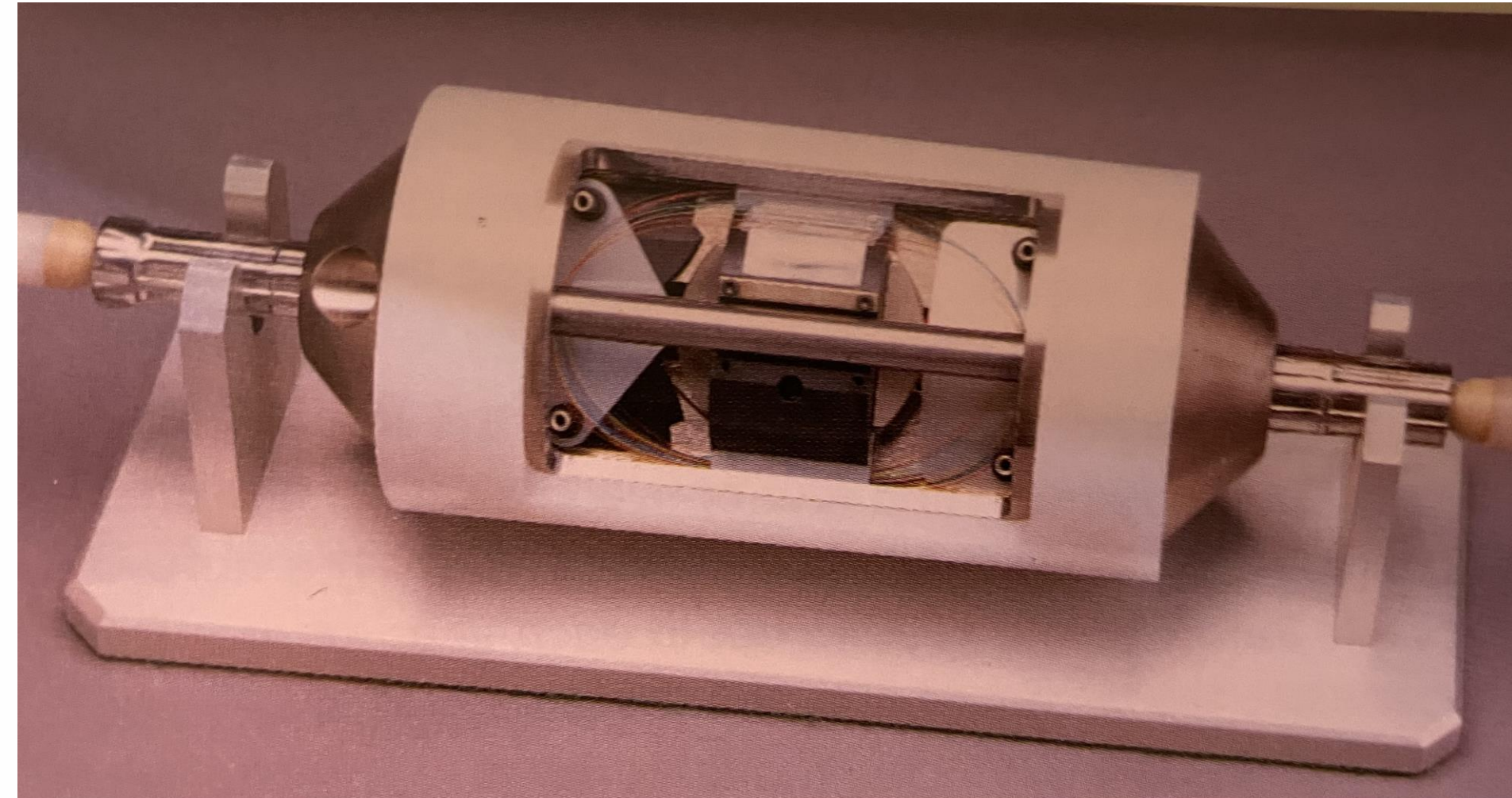
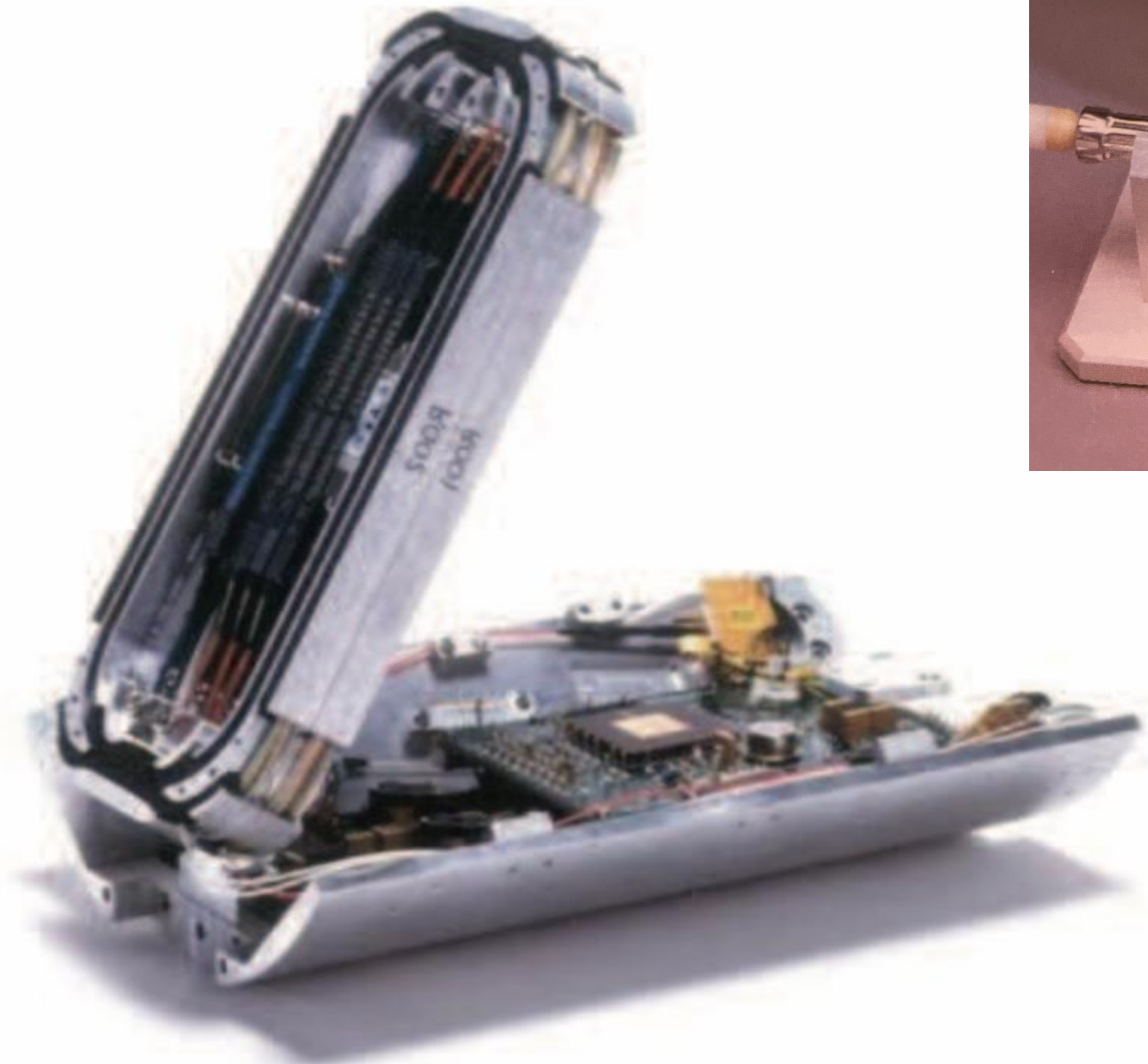
Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- Charrues pour «ensouillage» du câble :



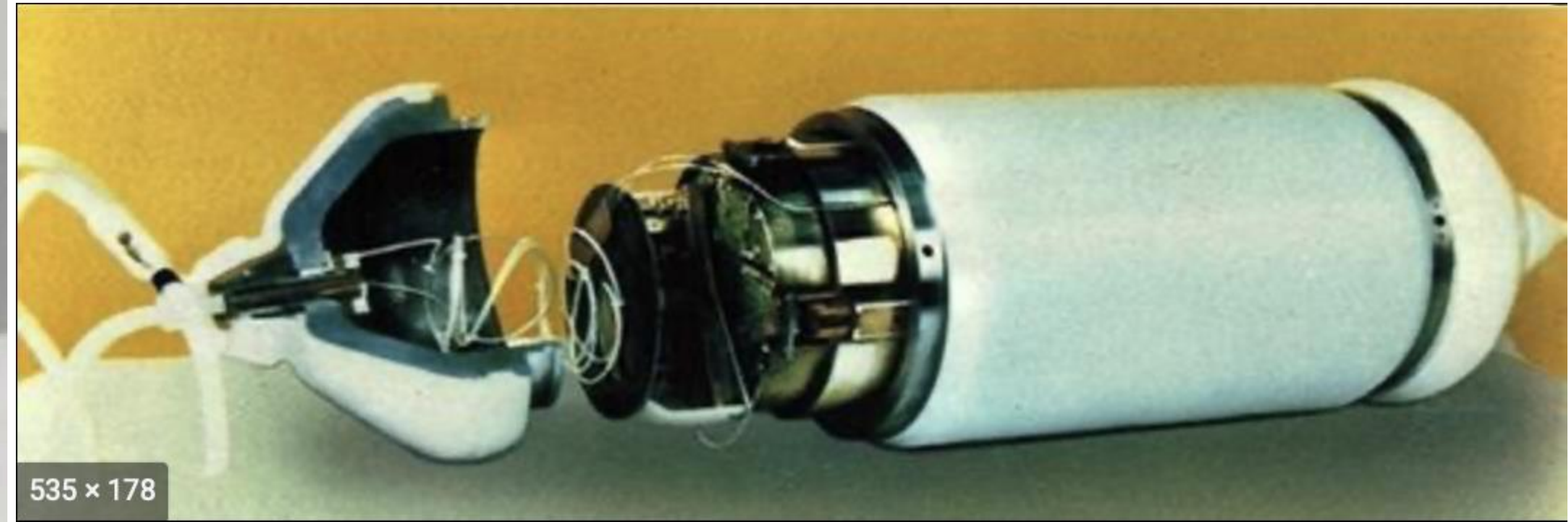
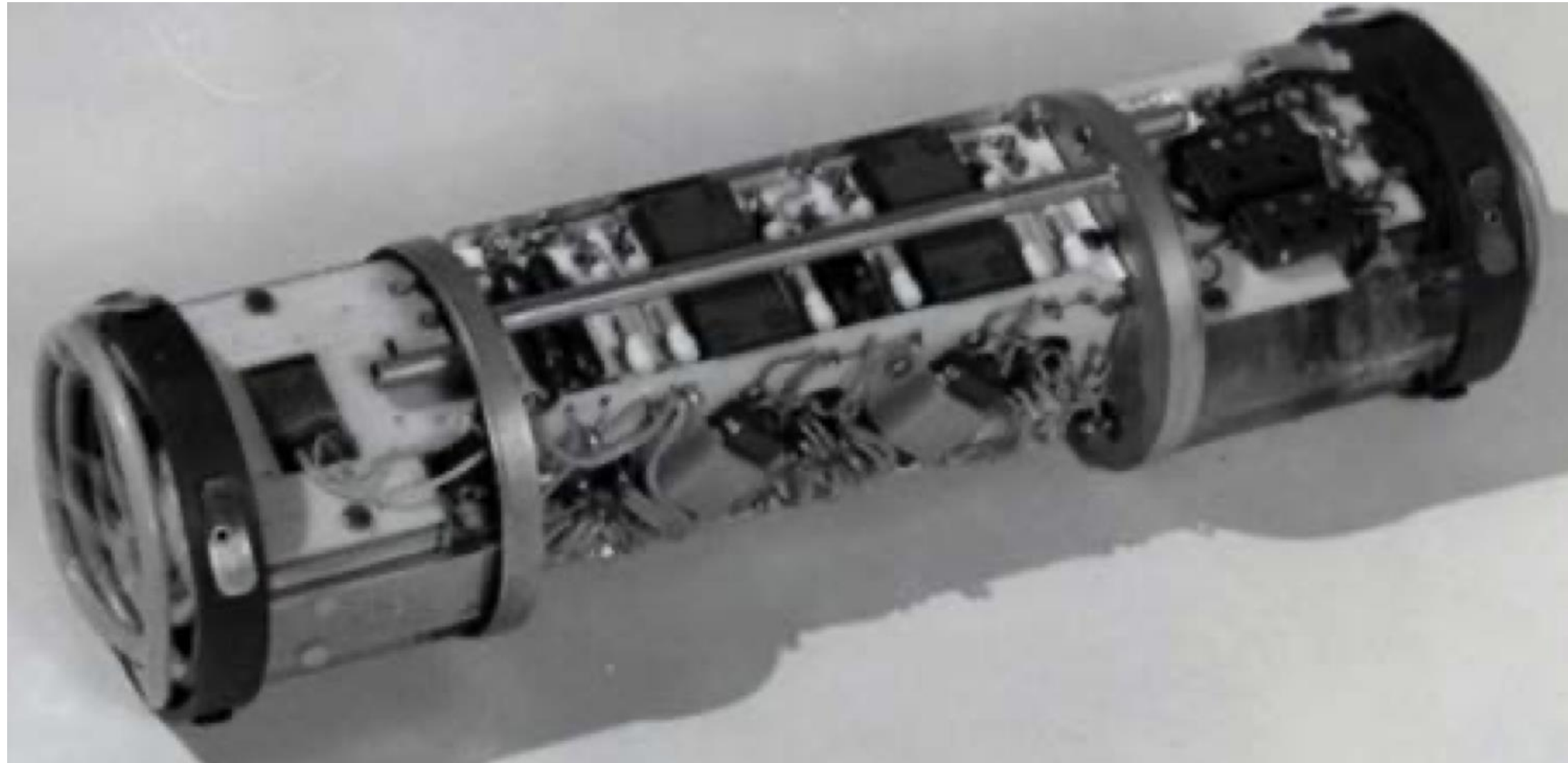
Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- Mécanique du bloc Optique du Répéteur Sous-Marin [ASN](#) :



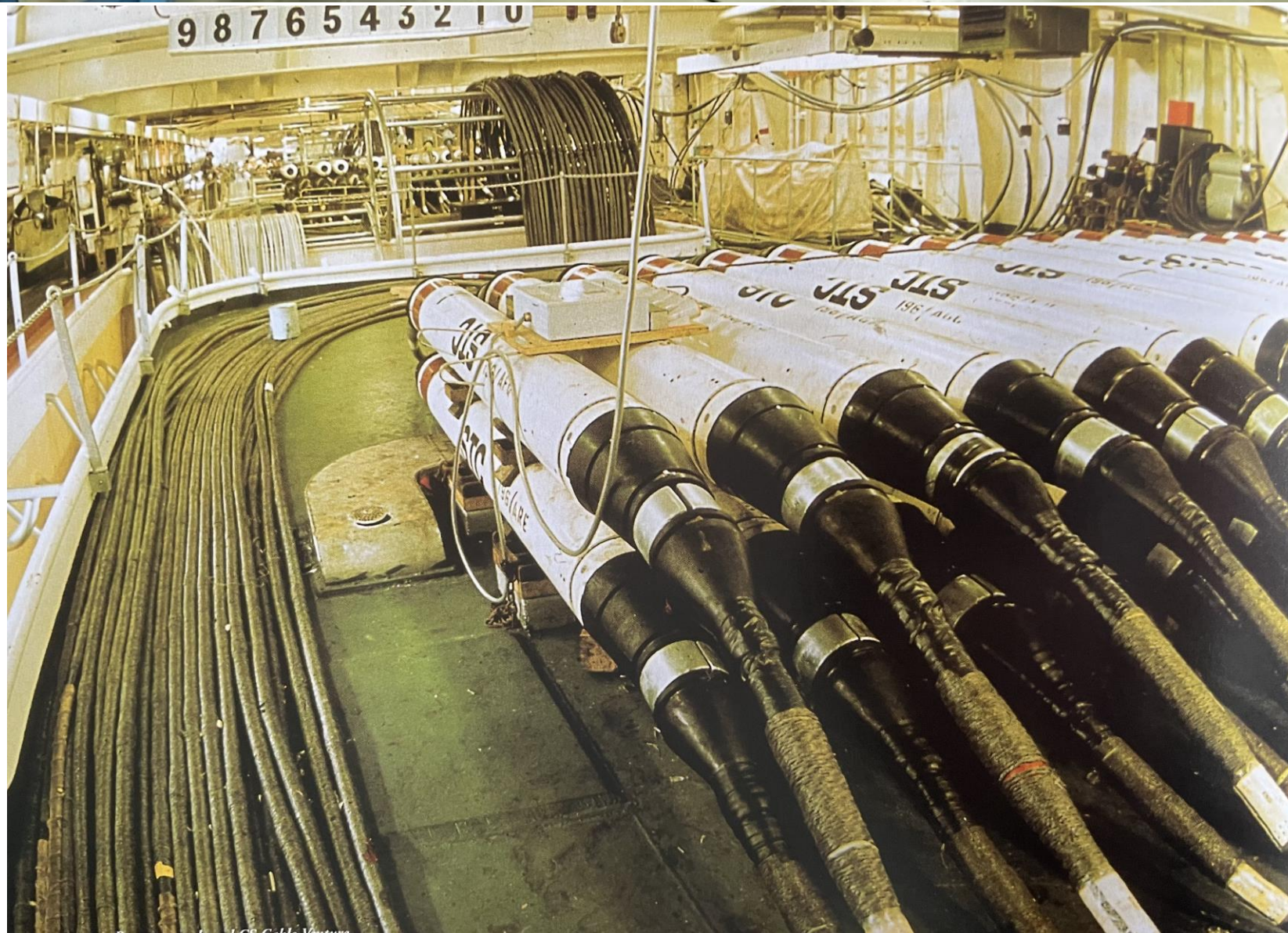
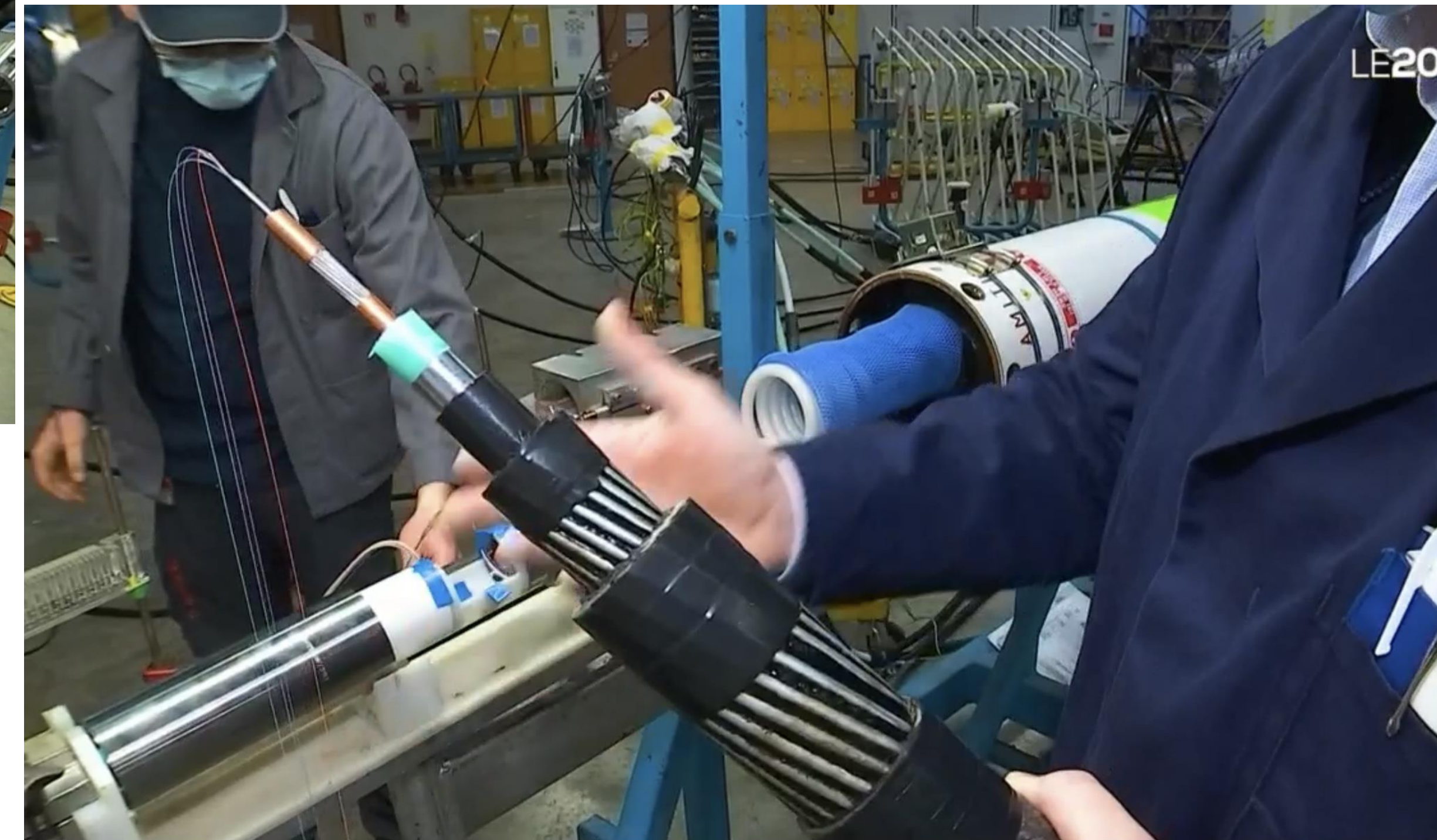
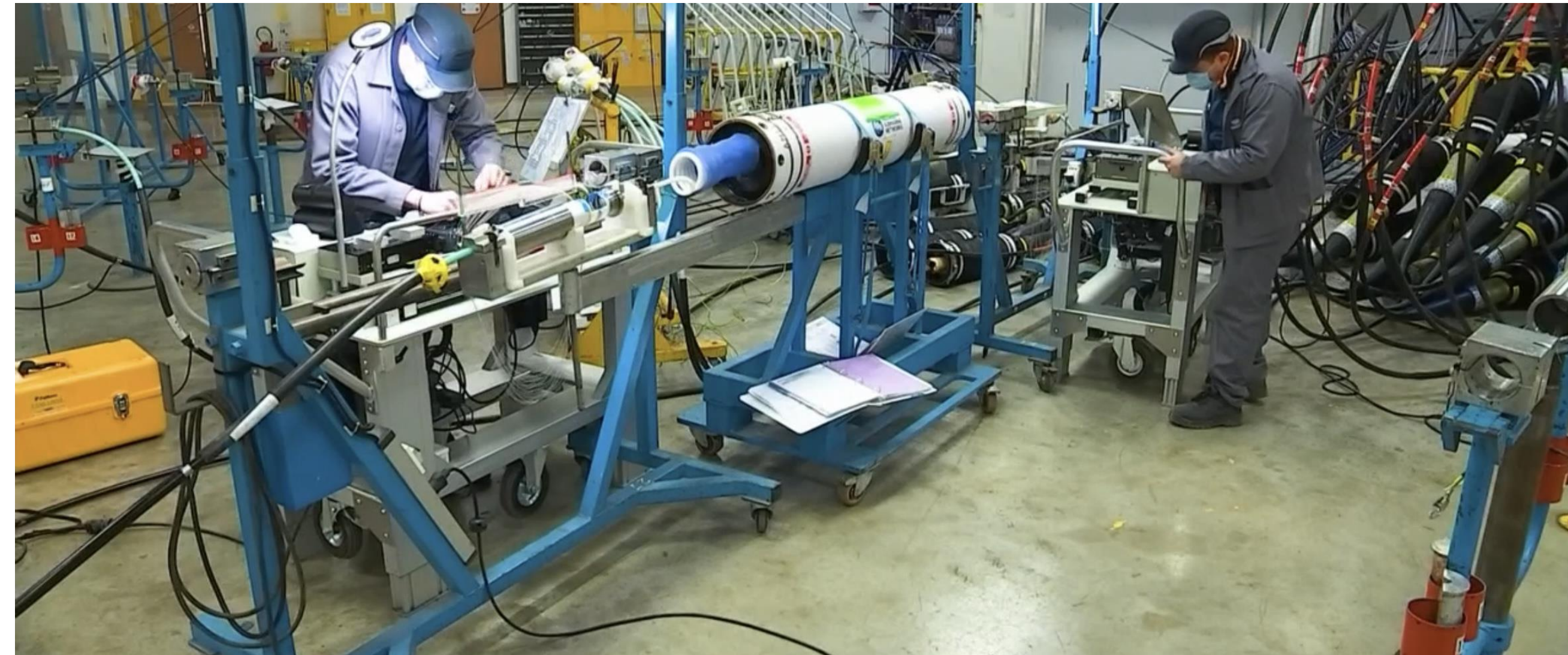
Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- Mécanique du Répéteur Sous-Marin Alcatel :



Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- Fabrication du Répéteur Sous-Marin : (Usine ASN Greenwich) : Salle Blanche :



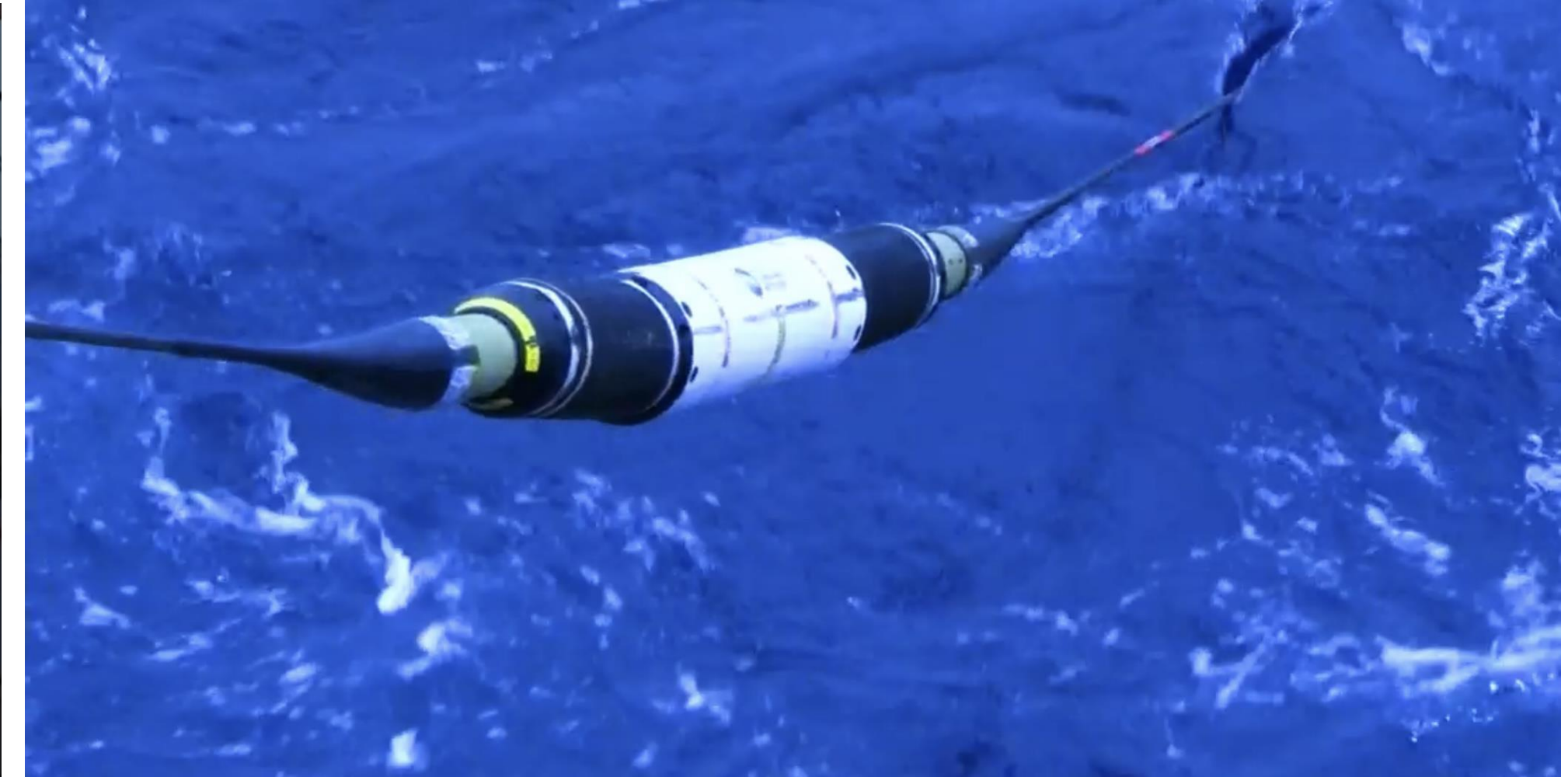
Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- Fabrication du Répéteur Sous-Marin (Usine [ASN](#) Greenwich) :



Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- Pose , immersion du Répéteur Sous-Marin :



Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- Pose , immersion du Répéteur Sous-Marin :



Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

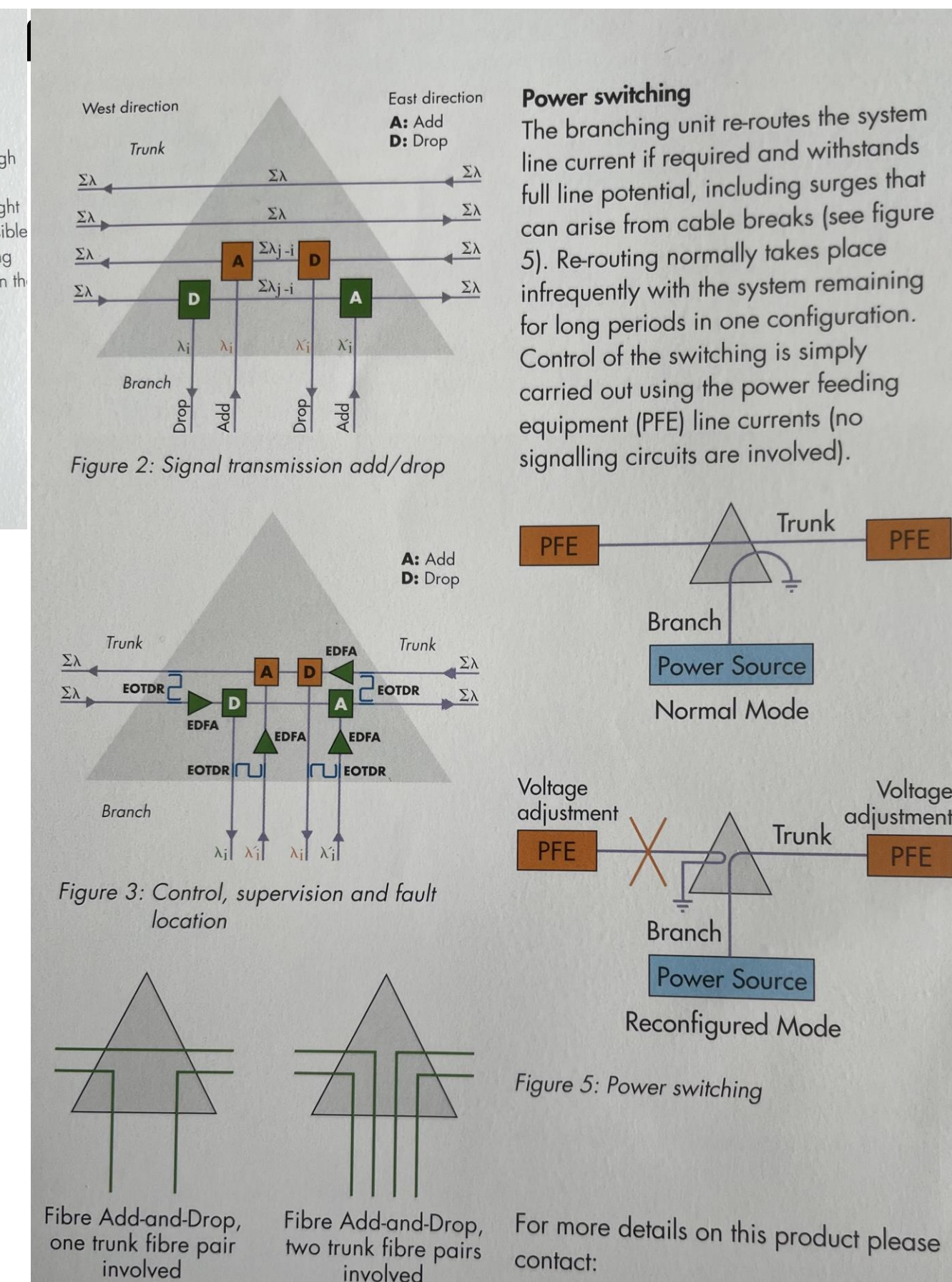
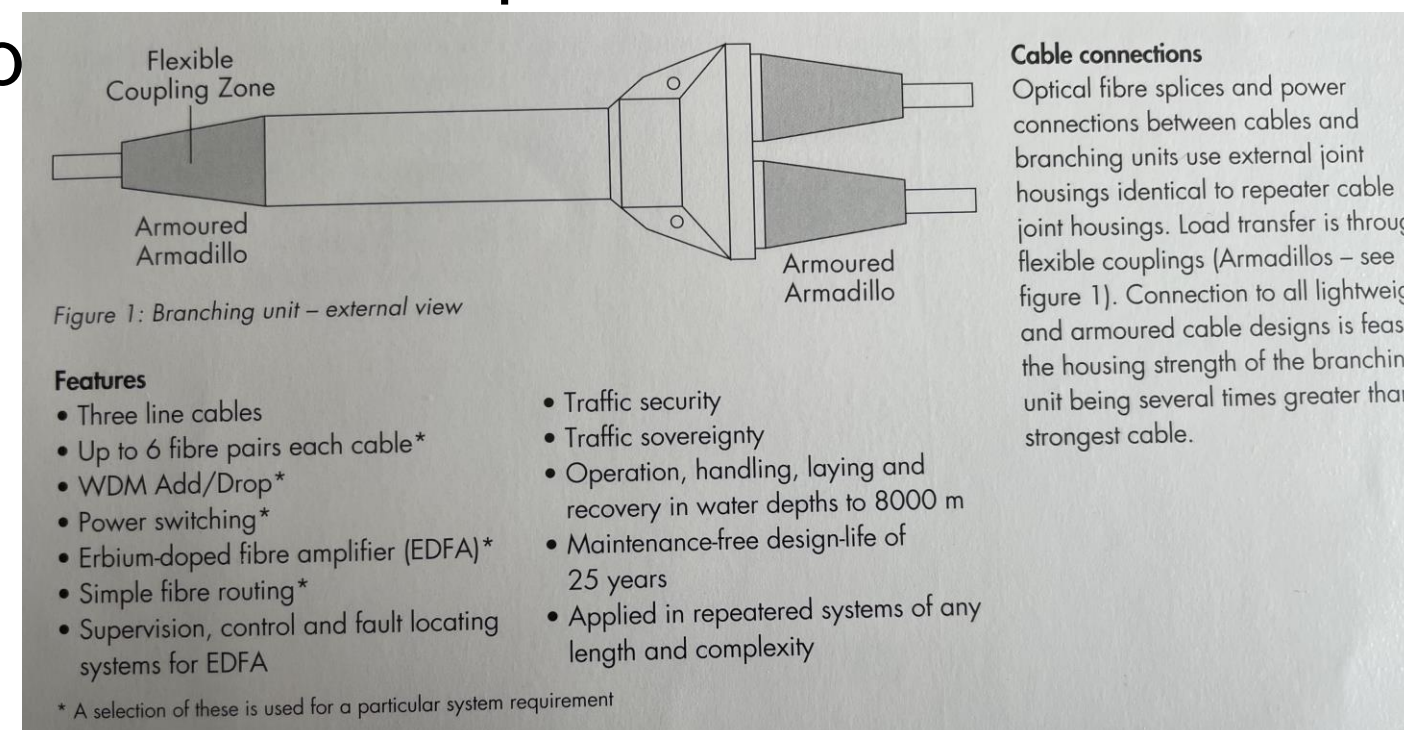
- Pose , immersion du Répéteur Sous-Marin :
- En principe , le câble et les répéteurs ne passent pas sur les grandes fosses marines , mais les contournent . Une exception : la liaison Chine-Australie en 1988/1990 , le câble passant sur les Fosses Mariannes (11000 m) , ce qui a nécessité la modification (renforcement étanchéité) des répéteurs .
- La position du câble et des répéteurs sur les fonds sous-marins est connue à moins de 1 mètre près
- Les principaux facteurs de panne sont les Chalutiers , les requins qui adorent mordre les câbles et les gouvernements portés sur l'espionnage et aux démocraties chancelantes bien que les USA et les Anglais ne sont pas irréprochables ...



Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- Le Branching Unit :

- Il est utilisé pour aiguiller une liaison vers 2 points d'atterrissement , pour réorganiser les transmissions en fonction des charges trafic , ou pour sécuriser le trafic en cas de coupure d'une liaison ; il doit assurer la continuité de la Télé-alimentation de la ligne et permettre la commutation de cette Télé-alimentation en cas de coupure câble .
- Il est principalement constitué de coupleurs optiques et d'une électronique de commande de commutation et de télésurveillance , le tout enfermé dans une mécanique étanche de type rép



Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- La Télé-alimentation (PFE , Power Feed Equipment) : implantée dans la Station Sous-Marine à terre :
- Elle est utilisée pour alimenter les Répéteurs et les Branching Units immergés en ligne .
- Sa tension de sortie est de 15000 Volts (réglable) et injecte un courant (# 1 Ampère) constant en ligne .
- Selon la longueur de la liaison on peut avoir 1 Télé-alimentation à chaque extrémité de la ligne .

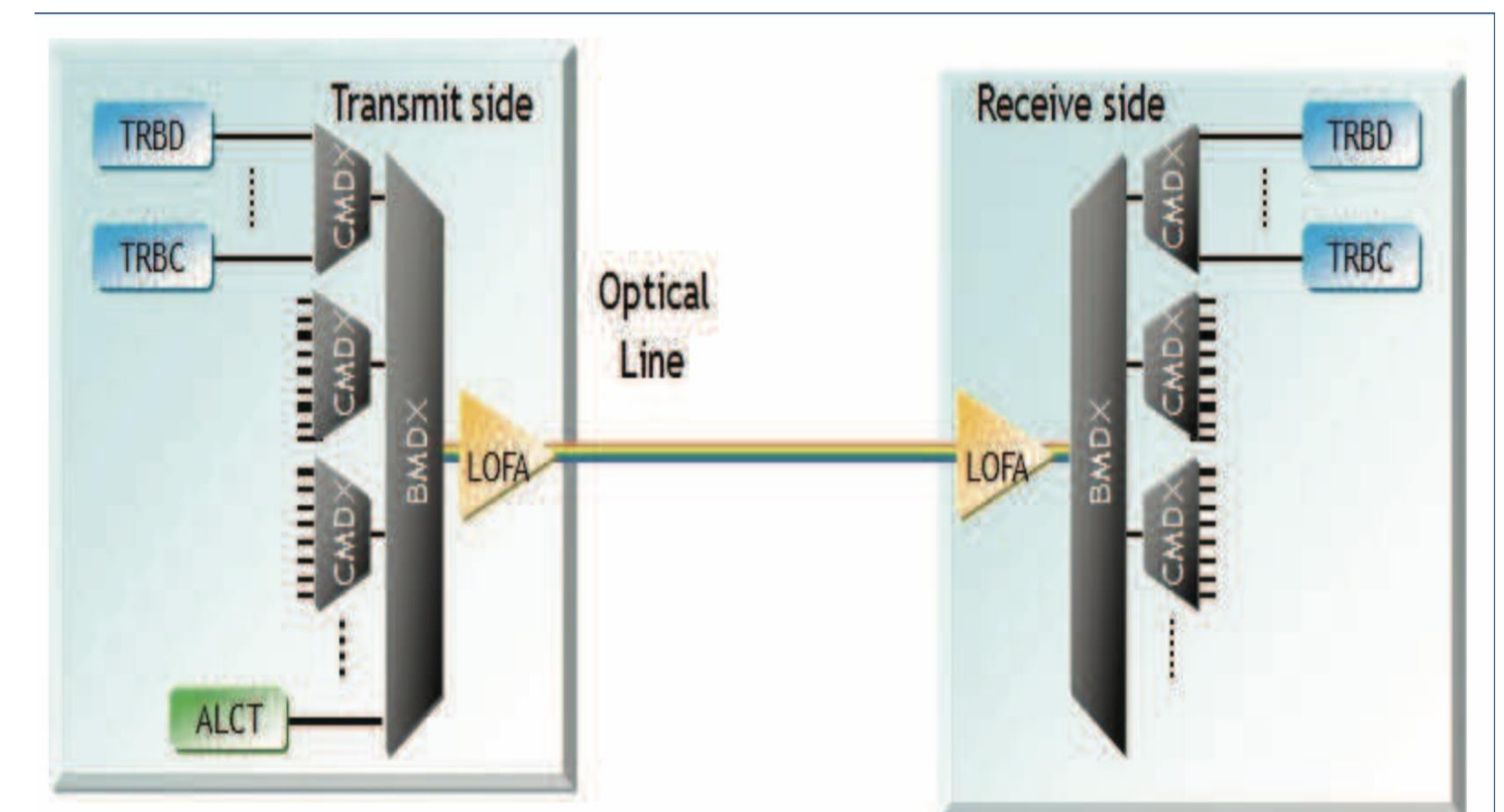
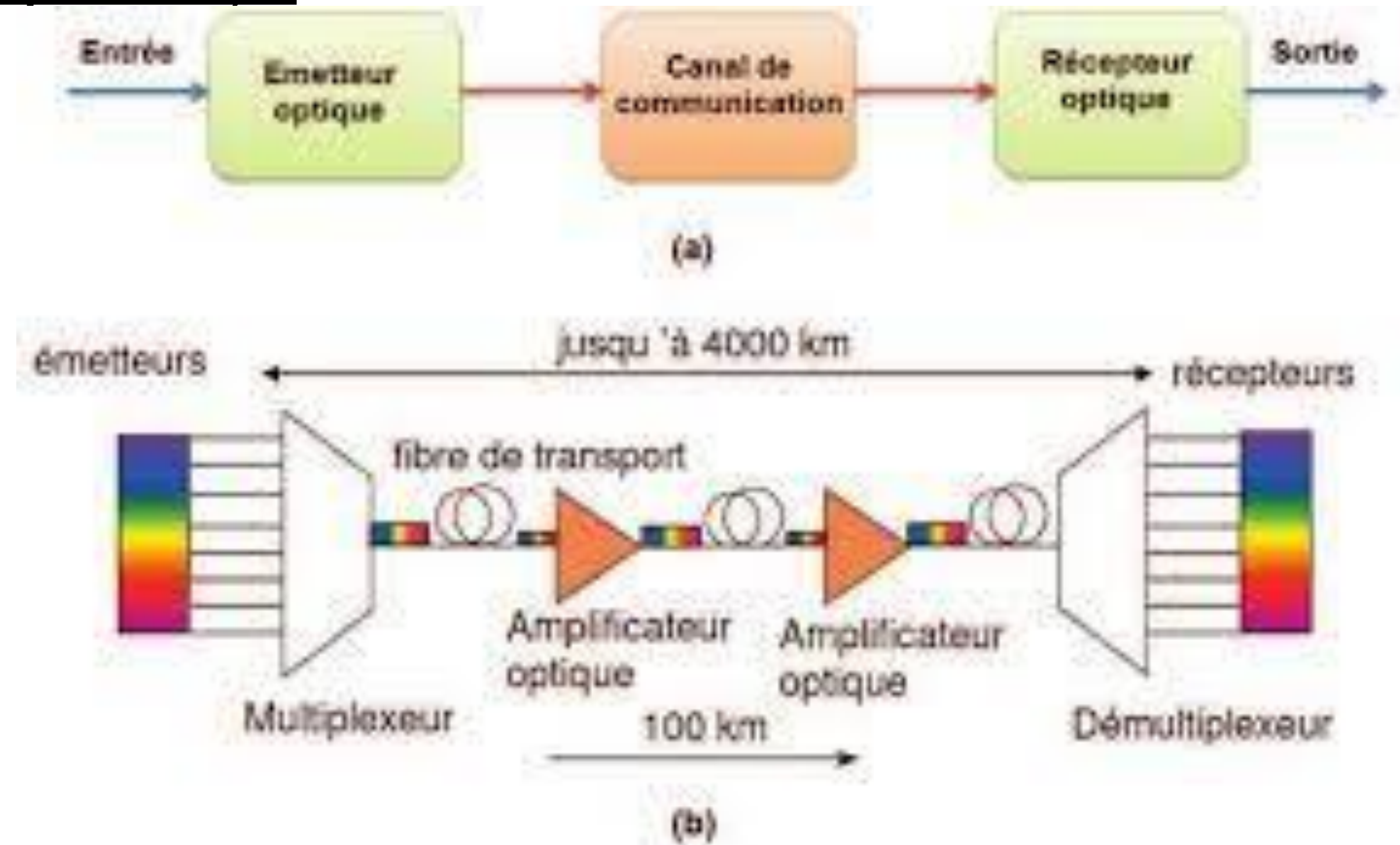
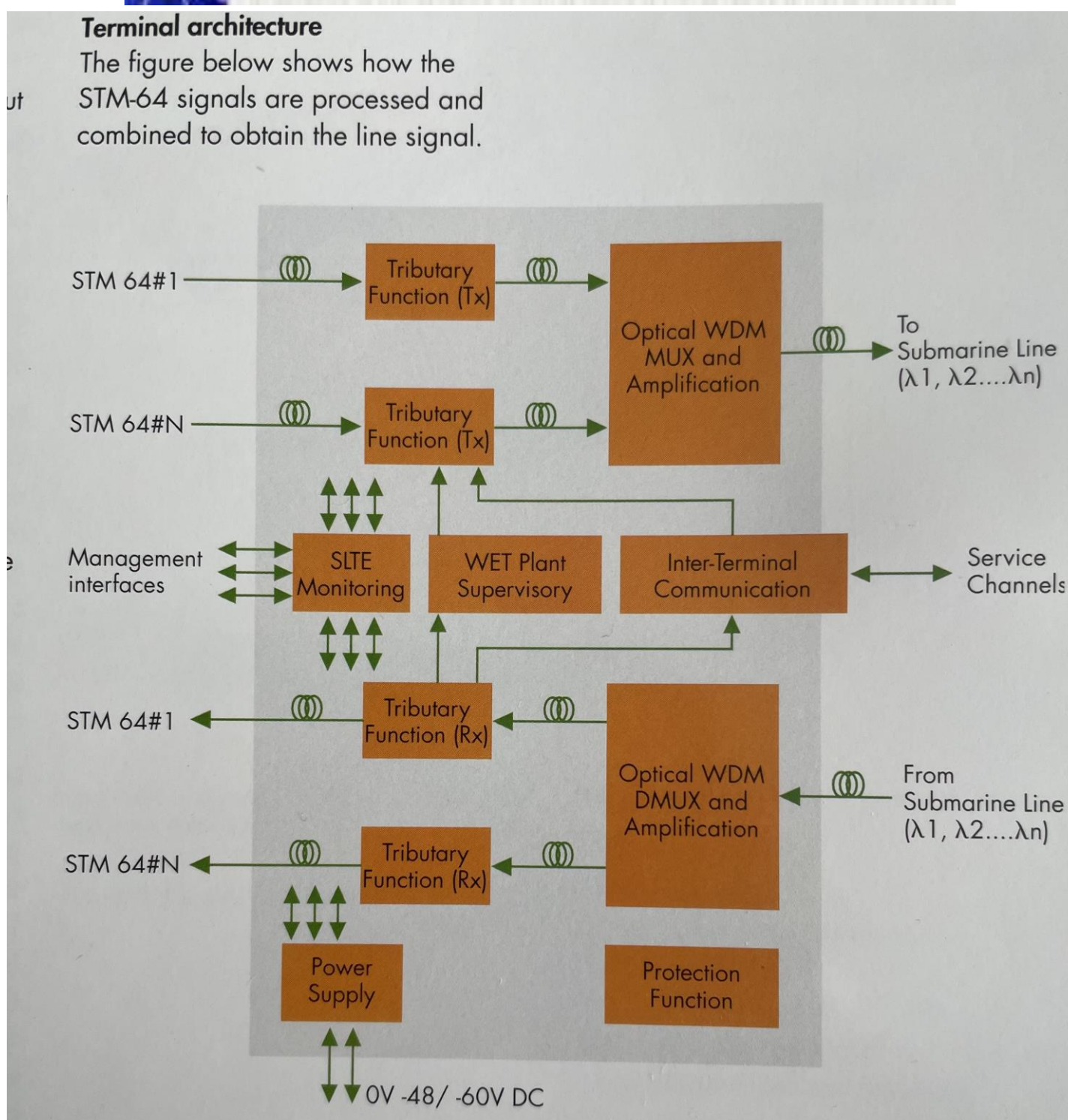
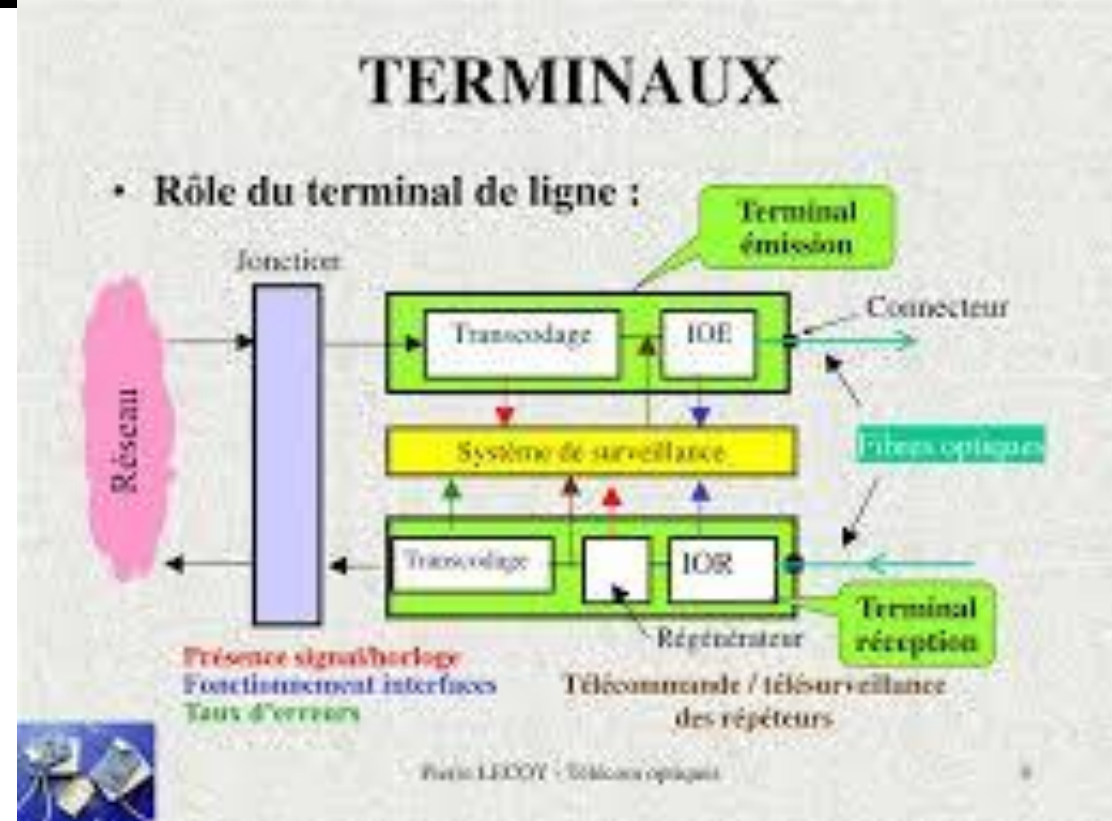


Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- A terre , le premier équipement sera le **SLTE** (**S**ubmarine **L**ine **T**erminal **E**quipment) :
 - Il réalise la liaison avec le Réseau de télécommunication Terrestre (**Orange** principalement en France) ,
 - Le Multiplexage/ Démultiplexage des signaux provenant du réseau Terrestre ,
 - Le codage en Trame longues distances (codes correcteurs d'erreurs , signaux de surveillance du câble , commande des BU ...)
 - La conversion du signal électrique en signal optique et « l'injection » sur le câble optique ...
 - Et bien sur l'inverse en Réception

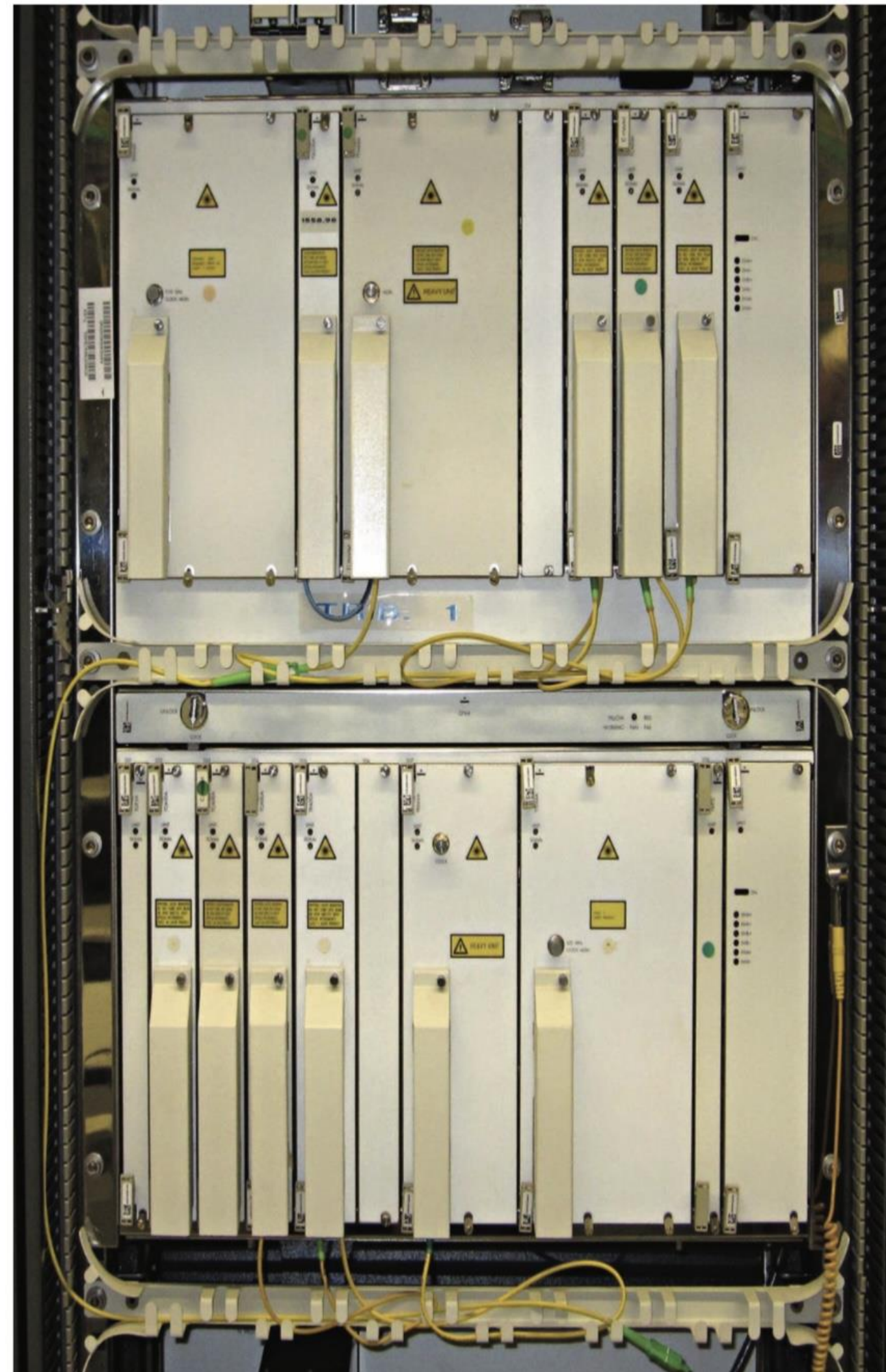
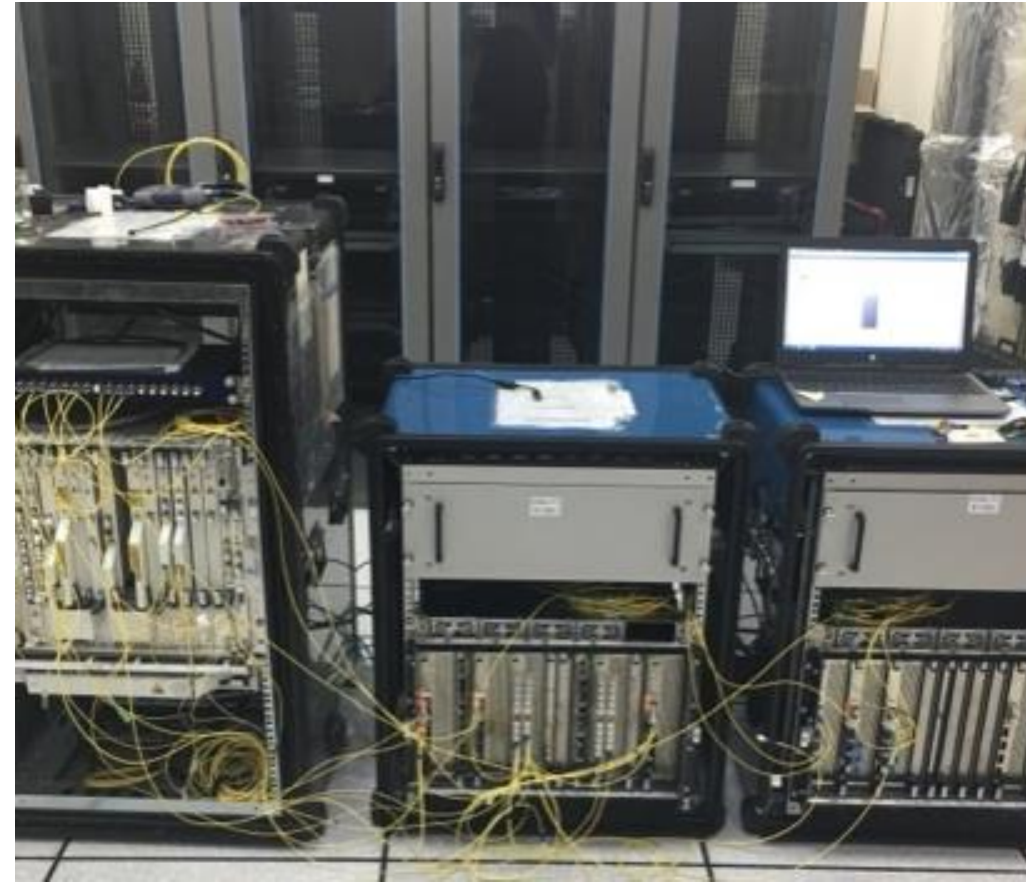
Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- SLTE (Submarine Line Terminal Equipment) :

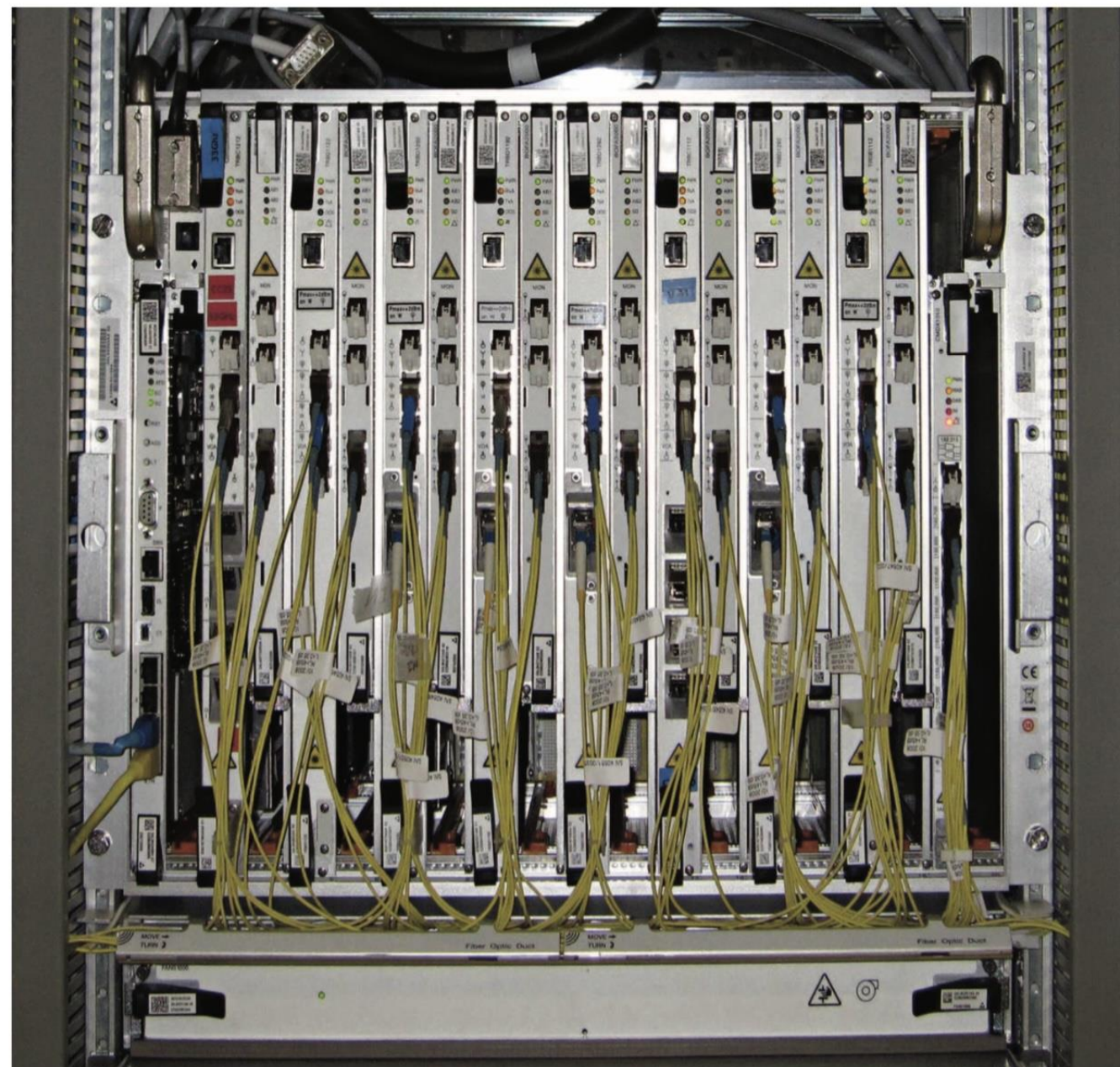


Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- **SLTE** (Submarine Line Terminal Equipment) :



Chassis Tera10R1



Chassis 1620LM

Les premiers terminaux 10Gb/s en 2000 à 10Gb/s étaient basés sur une technologie de composants discrets: 1 transpondeur sous marin 10Gb/s compact tenait dans deux shelves d'équipement. Un Terminal sous marin moderne comme le 1620LM d'ASN permet d'équiper 16 transpondeurs beaucoup plus performants dans un même shelf.

Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- SLTE (Submarine Line Terminal Equipment) :

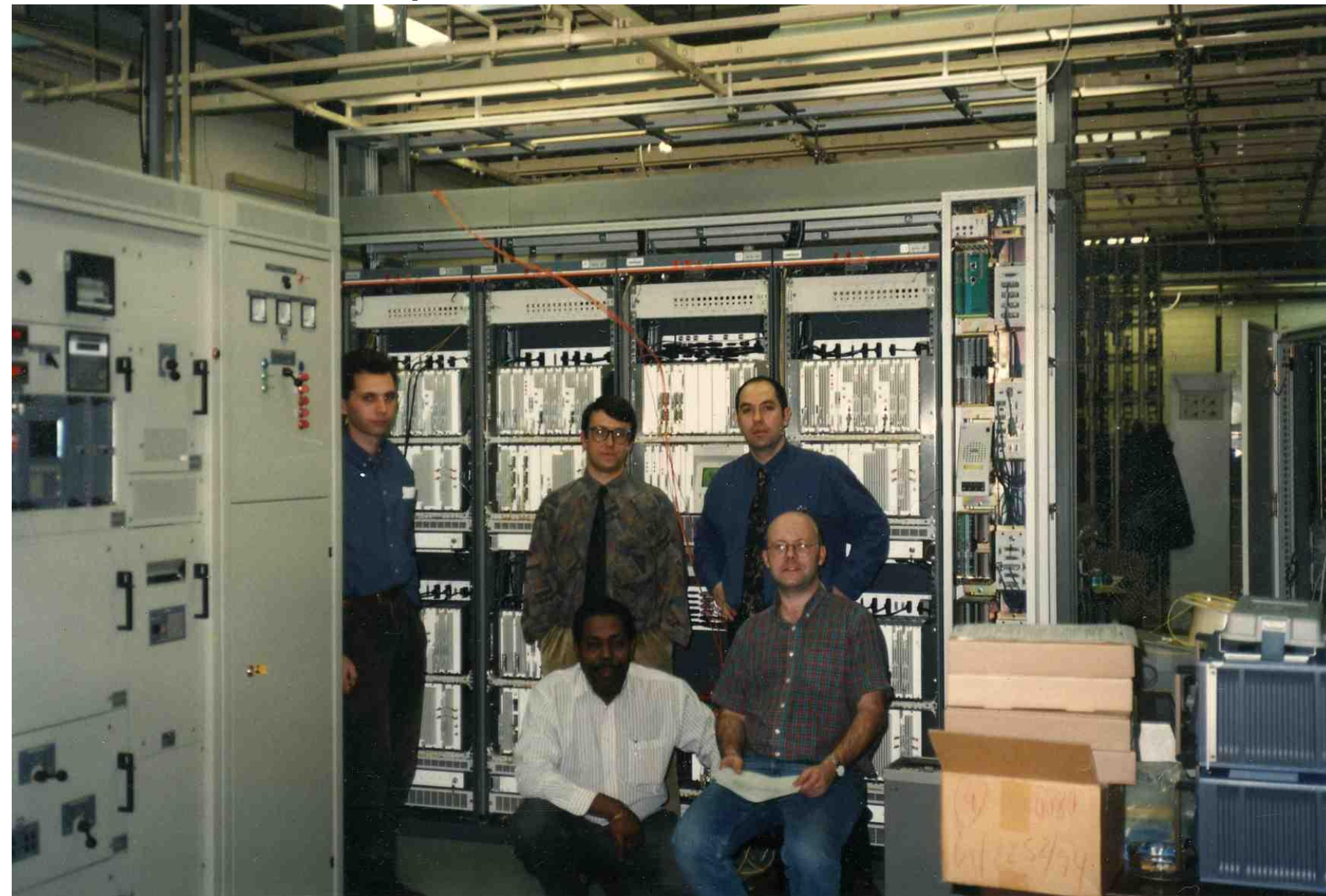
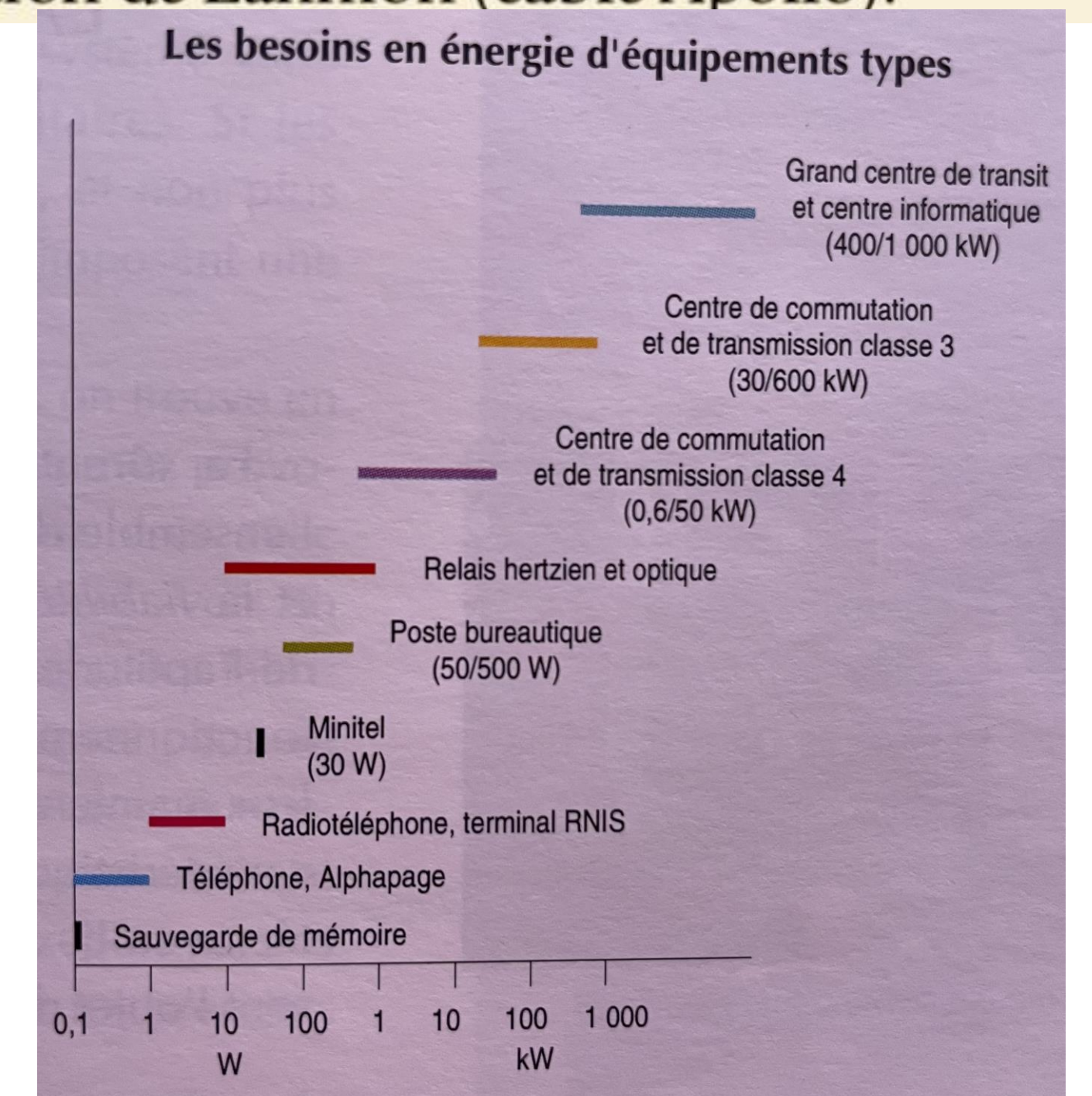
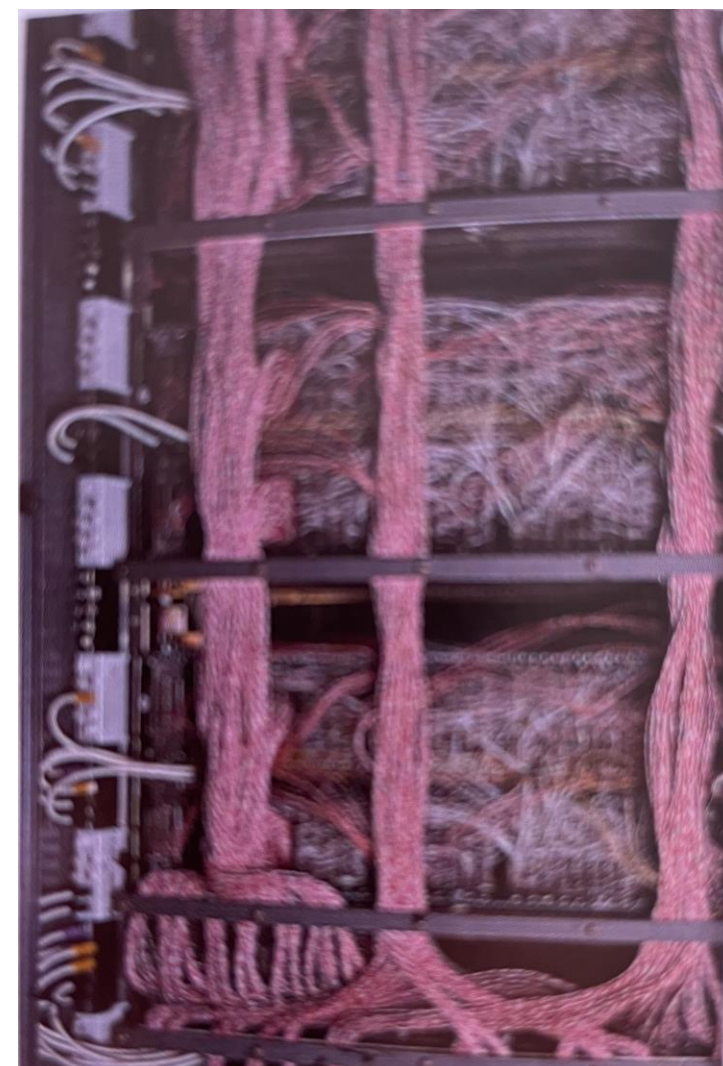


Figure 3. Terminaux sous-marins transatlantiques multi Tbit/s dans une station de Lannion (câble Apollo).



Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- ASN, Alcatel Submarine Networks : implantation mondiale :

- Worldwide presence



 **1,800**
Employees & contractors worldwide

650,000
km of optical cables deployed

330,000
km of submarine cables maintained

 **6**
3 cable ships for installation
3 maintenance vessels

Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

ASN has been operating and owning 6 vessels since March 2015

- 3 vessels for installation, laying and burial (sistership)
- 3 maintenance vessels for underwater communication networks
- Installation vessels may lay a maximum of 200km of cable per day up to 8000m deep (20km per day in plough burial operations)
- ASN and Louis Dreyfus Armateurs (LDA) have been partnering for many years, building and operating one of the best fleets of cable ships:
 - Since 2001, LDA has been the Ship Manager of the ASN fleet, providing technical expertise in marine installation and maintenance
 - This partnership has been renewed through a Ship Management agreement valid until 2020

Installation vessels

Maintenance vessels



Ile de Bréhat



Ile de Batz



Ile de Sein



Ile d'Aix



Lodbrog



Ile d'Ouessant



Alcatel Submarine Networks Marine – Owner / Operator

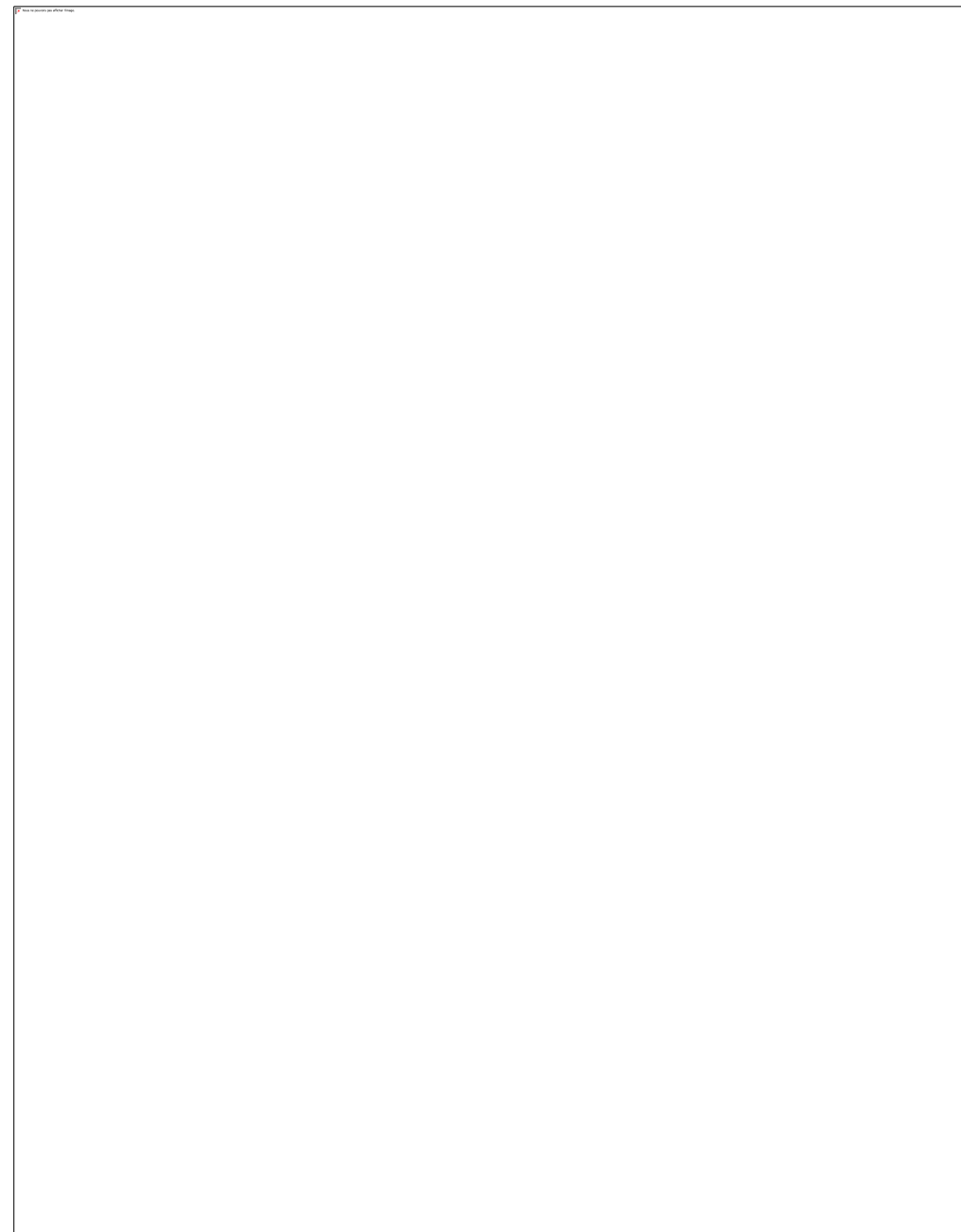
Ship Manager	Louis Dreyfus Armateurs					
Construction year	2002	2002	2002	1992	1982/2002	2011/2019
Length overall	140.36m	140.36m	140.36m	151.54m	143.40m	87.40m
Breadth	23.40m	23.40m	23.40m	20.50m	21.60m	19m
Draft	8.0m	8.0m	8.0m	7.8m	7.5m	5.1m
Accommodations	60/5x2 crew	60/5x2 crew	60/5x2 crew	13/64x2 crew	40/10x2 crew	14/23x2 crew
Plough	Plough SMD HD3 1500m Tow 130T Share 2.3m/3m	Plough SMD HD3 1500m Tow 130T Share 2.3m/3m	Plough SMD HD3 1500m Tow 130T Share 2.3m/3m			
ROV	ROVJet 400 HP 2500m / 2m burial Dynacon ext.frame	LARS Dynacon ext.frame		ROVJet 400 HP 2500m / 2m burial Dynacon A-Frame	ROVJet 400 HP 2500m / 2m burial Heila crane	ROVJet 400 HP 2500m / 2m burial Dynacon ext.frame

Le Monde des TÉLÉCOMMUNICATIONS

- Merci à tous d'avoir écouté avec patience cette (Technique , **longue et pesante**) présentation , et de nous avoir supporté Jean-Pierre et moi .

Mais maintenant passons aux choses sérieuses :

.... L'APERO ... LE CASSE-CROUTE ...



Enfin nous espérons ...



Le groupe des joyeux anciens devant les locaux de l'entreprise de notre président.

- **FIN Ouf pour tout le monde ... MERCI encore à Tous**