

**Zeitschrift:** Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri

**Herausgeber:** Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe

**Band:** 66 (1988)

**Heft:** 2

**Artikel:** Qu'est-ce que la numérisation? = Che cos'è la numerizzazione?

**Autor:** Vögtli, Kurt

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-876232>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 30.04.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Qu'est-ce que la numérisation?

## Che cos'è la numerizzazione?

Kurt Vögtli, Berne

### Was ist Digitalisierung?

Zusammenfassung. Die konsequente Anwendung der Digitaltechnik bis zum Kunden wird diesem erlauben, die verschiedensten Fernmeldedienste über denselben Anschluss abzuwickeln. Der Autor versucht deshalb, die wichtigsten Unterschiede zwischen analogen und digital kodierten Signalen einfach zu erläutern. Denn was zunächst wie eine unnötige Komplizierung aussieht, erlaubt Sprache, Musik, Texte, Bilder und Computerdaten auf dieselbe Art zu übertragen und zu vermitteln. Weitere Vorteile sind die Störfestigkeit derartiger Systeme sowie die Möglichkeit einfacher Datenverarbeitung und zeitlicher Verschachtelung.

Résumé. L'utilisation systématique de la technique numérique jusque chez l'abonné lui permettra de recourir aux services des télécommunications les plus divers sur un seul et même raccordement. C'est pourquoi l'auteur tente d'expliquer de façon simple les différences les plus importantes entre les signaux analogiques et ceux qui sont codés numériquement. Car, ce qui apparaît en premier lieu comme une complication inutile permet en réalité de transmettre et de commuter de la même manière, la parole, la musique, les textes, les images et les données d'ordinateur. D'autres avantages de tels systèmes résident dans leur immunité contre les perturbations et dans la possibilité de réaliser des traitements simples de données et de les imbriquer dans le temps.

Riassunto. L'applicazione sistematica della tecnica numerica fino all'abbonato permetterà a quest'ultimo di svolgere i più diversi servizi di telecomunicazione su un unico collegamento. L'autore cerca di spiegare con parole semplici le differenze più importanti fra segnali analogici e segnali digitali. Ciò che a prima vista può sembrare un'inutile complicazione permette di trasmettere e commutare allo stesso modo voce, musica, testi, immagini e dati. Gli altri vantaggi di questi sistemi sono la loro insensibilità ai disturbi e la possibilità di un trattamento semplice dei dati e del loro scaglionamento nel tempo.

Lorsque, dans le domaine des télécommunications, on parle de progrès fulgurants et de nouvelles applications, on en vient à évoquer tout naturellement des notions étroitement apparentées: La numérisation et la micro-électronique. Dans ce qui suit, il sera principalement question de la numérisation, étant entendu que la micro-électronique est un moyen fort adéquat pour réaliser les circuits de la technique numérique, bien qu'elle soit une chose foncièrement différente et qu'elle ne se limite pas à cette discipline. Bien avant le développement des puces, ces éléments typiques de la micro-électronique, les circuits numériques ont été réalisés selon la technique classique des tubes, à la différence qu'il fallait disposer à l'époque d'armoires entières ou même de salles pour loger les équipements qui, aujourd'hui, trouvent facilement place dans la poche d'un veston ou sur un bureau en tant qu'ordinateur personnel. On peut dire que la technique numérique se fonde essentiellement sur les mathématiques et qu'elle possède une valeur intrinsèque, indépendante des applications, alors que la micro-électronique facilite beaucoup les réalisations pratiques en permettant aussi de mettre constamment en œuvre de nouvelles applications.

Qu'entend-on au fond par numérisation? Il s'agit en premier lieu d'un phénomène inconnu dans la nature, attendu que des changements d'état rapides exigent toujours un peu de temps. Prenons comme exemple une paire d'états: clarté - obscurité. Dans la nature, la clarté du jour passe insensiblement à l'obscurité de la nuit: on parle du crépuscule, et le temps de fermeture de la paupière n'est pas non plus infiniment bref et même si les éclairs qui nous éblouissent atteignent très vite leur luminosité maximale, cette vitesse n'est pas infiniment rapide. Dans le monde de la technique numérique, les modifications d'état sont en revanche considérées comme de véritables sauts. Dans un conducteur, le passage de la circulation d'un courant à l'absence de courant, la disparition ou l'inversion de polarité d'une tension, l'état de

Quando si parla di rapida evoluzione e di applicazioni nuove nel campo delle telecomunicazioni, compaiono automaticamente due concetti strettamente legati fra loro: numerizzazione e microelettronica. Nell'articolo ci occuperemo soprattutto della numerizzazione; precisiamo subito che microelettronica e numerizzazione non sono la stessa cosa: la microelettronica è un mezzo molto adatto a realizzare la tecnica digitale, ma che non si limita a questa. I circuiti digitali venivano realizzati nella tecnica a tubi ben prima della fabbricazione dei chip, gli elementi più tipici della microelettronica. Tuttavia ciò che a quel tempo occupava armadi o addirittura locali interi oggi può essere infilato in tasca o posto su una scrivania quale computer da tavolo. Si può dire che la tecnica digitale nella sua essenza è radicata nella matematica e ha un proprio valore che non dipende dalle applicazioni; la microelettronica invece semplifica notevolmente l'applicazione pratica e permette di realizzare continuamente applicazioni nuove.

Ma che cos'è effettivamente la numerizzazione? Prima di tutto è qualcosa che in natura non è possibile poiché anche il cambiamento più rapido di uno stato richiede sempre un minimo di tempo. Prendiamo come esempio la coppia antitetica chiaro-scuro: nella natura, tra il giorno e la notte c'è il crepuscolo; la palpebra per chiudersi ha bisogno di un lasso di tempo che non può essere infinitamente corto; perfino i lampi che ci acccano, pur raggiungendo il bagliore massimo entro brevissimo tempo, non sono infinitamente veloci. Nel mondo della tecnica digitale i cambiamenti di stato sono invece considerati dei veri e propri salti: si suppone cioè che il passaggio dal conduttore percorso da corrente a quello senza corrente, che la caduta o l'inversione di polarità di una tensione, che il cambiamento di stato da luce a non luce in un punto preciso di un conduttore in una fibra ottica avvengano in un tempo infinitamente corto. Naturalmente nella pratica ciò non può essere realizzato che in modo approssimativo, tuttavia per con-

présence ou d'absence de lumière à un point déterminé d'une fibre optique peuvent varier à une vitesse quelconque. En pratique, il est vrai qu'une vitesse transitoire infiniment rapide ne peut être réalisée que d'une manière approchée, mais, pour des considérations théoriques, une telle idéalisation est très utile. Pour commencer, un exemple bien connu va permettre d'illustrer la relation qui existe entre la technique analogique et la technique numérique: le fonctionnement du téléphone.

Lorsque la parole parvient sur l'élément du combiné qui se trouve face à la bouche, la capsule microphonique qui s'y trouve transforme les ondes sonores, (c'est-à-dire les variations de pression) en variations de courant électrique comparables (c'est-à-dire analogues). Ces variations sont acheminées dans les conducteurs de cuivre du réseau téléphonique et reconverties en ondes sonores audibles dans l'écouteur que le correspondant applique contre son oreille (la capsule d'écoute du combiné). La numérisation ne concerne dans cet exemple que le signal électrique analogique produit par les ondes sonores, qui est acheminé d'un central à l'autre et qui parvient, selon le désir de l'utilisateur, à un correspondant habitant la même maison ou à un appareil téléphonique situé sur un autre continent.

A l'origine, un signal vocal se compose donc uniquement de variations de pression d'air rapides, c'est-à-dire de variations analogues à celles du signal électrique produit par le microphone dans lequel on parle. Pourquoi donc cette variation est-elle seulement «analogue» et non pas identique? Cela provient du fait que la capsule du microphone ne peut convertir les variations de pression produites par la voix en variations de courant électrique que dans une certaine mesure. Selon son type de construction, cette capsule n'est tôt ou tard plus en état de suivre des variations de pression particulièrement lentes ou très rapides.

Il est vrai que pour la reproduction musicale de très haute qualité, on utilise des microphones, des disques ou des bandes magnétique capables de produire des signaux électriques qui suivent pratiquement la même courbe que les variations de pression de la source sonore originale. Si les amplificateurs, en particulier les enceintes acoustiques, sont également capables de convertir le signal électrique en un signal sonore restituant le spectre acoustique complet, l'impression que ressent finalement l'oreille est comparable à celle que produit le son original, raison pour laquelle on parle alors d'installation de haute fidélité. En téléphonie, la qualité sonore est cependant limitée. Il est vrai que les possibilités de l'appareil téléphonique sont harmonisées avec celles du réseau, de sorte qu'une bonne intelligibilité est toujours garantie, bien qu'on puisse aisément distinguer le son d'une conversation téléphonique de celui d'une conversation originale. Les variations de pression que l'on veut transmettre peuvent être caractérisées par des chiffres significatifs. On sait par exemple que notre oreille peut percevoir des oscillations dans la plage de 30...15 000 cycles par seconde, alors que le téléphone ne peut restituer que 300...3400 oscillations par seconde. Or, un signal sonore n'est pas seulement caractérisé par le spectre des fréquences qui le composent, mais aussi par les excursions de ce signal à partir de la valeur zéro (amplitude), en fonction du volume so-

siderazioni teoriche questa idealizzazione è di estrema utilità.

Prima di tutto vogliamo esaminare quali relazioni vi sono fra la cosiddetta tecnica analogica e la tecnica digitale prendendo come esempio il telefono.

Quando la nostra voce giunge alla capsula microfonica incorporata nel microtelefono, questa capsula trasforma le onde sonore (cioè le variazioni di pressione) in variazioni elettriche omogenee (cioè analogiche) di corrente. Quest'ultime passano attraverso i conduttori di rame della rete telefonica e nella capsula telefonica dell'interlocutore vengono convertite nuovamente in onde sonore udibili dall'uomo. Nel nostro esempio, la numerizzazione riguarda solo il segnale elettrico analogico che, generato dalle onde sonore, passa attraverso le diverse centrali e perviene, a seconda dei casi, all'interlocutore nella stessa casa o a una stazione telefonica in un altro continente.

Originariamente un segnale vocale è dunque costituito da rapide variazioni della pressione nell'aria; un andamento analogo lo ha anche il segnale elettrico analogico del microfono messo in vibrazione. Perché analogo e non identico? Perché la capsula microfonica può trasformare le variazioni di pressione di una voce in variazioni elettriche di corrente solo fino a un determinato livello. A seconda del tipo di costruzione, a un certo punto non è più in grado di seguire variazioni particolarmente lente o molto rapide.

Per riproduzioni musicali di alta qualità sono tuttavia in commercio microfoni, dischi e nastri che generano segnali elettrici che hanno praticamente lo stesso andamento delle variazioni originali di pressione di una fonte sonora. Se anche gli amplificatori e in particolare gli altoparlanti, in cui il segnale elettrico viene nuovamente convertito in un segnale acustico, sono in grado di trattare tutto lo spettro, il suono percepito alla fine dall'orecchio è analogo a quello originale (i cosiddetti impianti ad alta fedeltà). In un telefono però la qualità sonora è limitata. Anche se le possibilità tecniche degli apparecchi telefonici sono accordate a quelle della rete in modo da garantire sempre una buona comprensione, è molto facile distinguere una conversazione telefonica da una non telefonica. La capacità di trasmettere variazioni di pressione può essere illustrata in modo più chiaro con cifre.

Si sa che l'orecchio umano è in grado di percepire suoni nella banda fra 30 e 15 000 vibrazioni al secondo, mentre un telefono è limitato nella banda fra 300 e 3400. Un segnale sonoro non è contraddistinto solo dal suo spettro di frequenza, ma anche dalla sua deviazione rispetto alla posizione zero (ampiezza) in corrispondenza al volume del suono. Anche in questo caso la differenza fra molto forte e molto debole è assai maggiore in una conversazione diretta che non in una conversazione telefonica.

Finora è stato analizzato solo il segnale telefonico analogico. In cosa consiste la differenza fondamentale rispetto al telefono digitale? In qualcosa che non è stato ancora menzionato, cioè nel fatto che il segnale analogico e il suono da generare hanno un lasso di tempo prolungato senza segnale solo in stato di riposo. Altrimenti abbiamo solo passaggi per lo zero, come già detto, più o meno, a seconda della frequenza del suono. Per un segnale digitale ciò è completamente diverso. Se



Fig. 1  
Par le prélèvement périodique d'échantillons, un signal analogique continu est converti en un signal discontinu en modulation par impulsions en amplitude (PAM) – Un segnale analogico continuo viene convertito in un segnale PAM (modulazione a impulsi in ampiezza) discontinuo, mediante prelievo periodico di campioni

nore instantané. Ici également, la différence entre un signal très faible et un signal très puissant, telle qu'elle apparaît dans une conversation de bouche à oreille, est beaucoup plus grande que dans le cas d'une conversation téléphonique.

Jusqu'ici, seul le signal téléphonique analogique a été examiné. Où est en fait la différence essentielle par rapport au téléphone numérique? On pourrait dire que le signal analogique, comme le son qui l'a produit, ne présente une absence de signal prolongée qu'en cas de silence. Les passages à zéro, comme nous l'avons évoqué, se produisent plus au moins fréquemment suivant qu'il s'agit d'un son aigu ou d'un son grave. Dans le cas d'un signal numérique, la situation est entièrement différente. Si, en tant que limite supérieure d'un train de signaux analogiques, on se représente une paroi, dont la longueur symboliserait l'axe du temps et la hauteur le volume du son, le passage de la technique analogique à la technique numérique consisterait à remplacer cette paroi par une palissade constituée de lattes (fig. 1). On réalise facilement que l'écart entre les diverses lattes doit être d'autant plus faible et que, partant, celles-ci doivent être d'autant plus étroites que la variation de signal est rapide. La théorie nous enseigne que pour la reproduction d'une oscillation présentant  $x$  passages à zéro (variation d'une surpression à une sous-pression de l'air),  $x$  petites lattes, c'est-à-dire  $x$  valeurs momentanées sont nécessaires. Dans le cas d'un téléphone numérique, cela représente 8000 valeurs momentanées par seconde, ce qui correspond à une limite supérieure de saisie de 4000 oscillations par seconde. Notre palissade se composant de 8000 lattes de diverses hauteurs correspondrait donc, pour ce qui est de la teneur en informations, à un signal analogique comportant des composantes d'oscillations jusqu'à 4000 oscillations par seconde. La différence entre 3400 oscillations par seconde en mode analogique et 4000 oscillations par seconde en mode numérique est d'ailleurs l'une des raisons pour lesquelles on peut dire que la téléphonie numérique procure une certaine amélioration de la qualité du son.

Mais où est l'avantage d'une palissade en lattes par rapport à une paroi du point de vue de la technique des cir-

rappresentiamo una sequenza di segnali analogici quale margine superiore di una parete, con il tempo quale asse longitudinale e l'altezza quale misura del volume, il passaggio alla tecnica digitale consiste nel sostituire la parete con uno steccato (fig. 1). È facile osservare che la distanza tra le singole aste diminuisce e che esse si assottigliano, quanto più rapidi sono i cambiamenti del segnale. La teoria insegna che per la riproduzione di un'oscillazione di  $x$  passaggi per lo zero (passaggio da sovrappressione a depressione nell'aria) devono essere a disposizione  $x$  aste, cioè  $x$  valori istantanei. Per un telefono digitale si tratta di 8000 valori istantanei al secondo, corrispondenti a un limite di capacità superiore di 4000 oscillazioni al secondo. In quanto a contenuto informativo, il nostro steccato di 8000 aste di diversa altezza sarebbe dunque equivalente a un segnale analogico di 4000 oscillazioni al secondo. La differenza tra 3400 oscillazioni al secondo per l'analogico e 4000 oscillazioni al secondo per il digitale è del resto uno dei motivi per i quali si può dire che la telefonia digitale porta un certo miglioramento della qualità.

Quali sono invece i vantaggi dello steccato rispetto alla parete, lato commutazione? Il poeta Christian Morgenstern già lo sapeva: «c'era una volta uno steccato con spazi vuoti per guardarci attraverso». Gli spazi intermedi rappresentano effettivamente la differenza sostanziale: 8000 aste di diversa altezza, fra le quali di volta in volta c'è un intervallo di 125 milionesimi di secondo ( $\mu s$ ).

Se per un motivo qualsiasi l'altezza di un'asta viene modificata, non è possibile localizzare né annullare questo cambiamento: un segnale disturbato non può cioè essere riportato nello stato non disturbato. Ciò diventa possibile solo se dalla rappresentazione ad aste di diversa altezza (modulazione d'impulsi in altezza) si passa alla modulazione ad impulsi in codice (Puls-Code-Modulation = PCM). In questo caso ci viene in aiuto l'altro termine utilizzato per digitalizzazione e cioè «numerizzazione». Ci si può per esempio immaginare lo steccato formato di aste che non sono altro che i segmenti di una scala. Se a terra tutte le aste hanno lo stesso valore iniziale (p. es. 0 cm) è sufficiente conoscere l'altezza delle aste che si susseguono a distanza regolare, per co-

cuits? Seul le poète (Christian Morgenstern) a su l'exprimer très finement: «Es war einmal ein Lattenzaun mit Zwischenraum hindurchzuschauen» (il y avait une fois une palissade avec des interstices au travers desquels on pouvait voir). En effet, l'interstice entre les lattes est la différence essentielle. On entend par là les 8000 lattes de hauteur diverses et les interstices d'un 125 millièmes de seconde ( $\mu\text{s}$ ) qui les séparent.

Si, pour une raison quelconque, la hauteur d'une latte varie, cette modification ne peut pas être perçue, et, par conséquent, elle ne peut pas non plus être supprimée. Cela signifie qu'un signal perturbé ne peut pas être ramené à l'état d'un signal non perturbé. Or, on peut néanmoins y parvenir en passant de la représentation par des lattes de diverses hauteurs (modulation d'impulsions en amplitude) à la modulation codée (modulation par impulsions et codage = MIC). A cette égard, le terme français de numérisation est beaucoup plus explicite que le terme anglais ou allemand de «digitalisation». On peut par exemple se représenter une palissade qui ne se composerait que de lattes correspondant aux sections d'une règle graduée. Si toutes ces sections avaient la même valeur d'origine à partir du sol (par exemple 0 cm), il suffirait de connaître la hauteur des lattes se succédant à de mêmes intervalles pour construire la palissade, c'est-à-dire une nouvelle mesure de la hauteur toute les 125  $\mu\text{s}$  (modulation d'impulsions en amplitude = PAM). Dans la technique MIC, on procède exactement de cette manière, à la différence que l'on n'indique pas l'amplitude par des chiffres décimaux, comme sur une règle graduée normale, mais par une succession de «0» et de «1» (fig. 2). L'intérêt réside dans le fait que zéro signifie par exemple «absence de courant, de tension ou de lumière», et un «présence de courant, de tension ou de lumière» ou, dans notre exemple, absence ou présence d'une latte. Dans une telle repré-

struire lo steccato. Ogni 125  $\mu\text{s}$  dunque, una nuova misura di altezza (modulazione d'impulsi in ampiezza = PAM). Nel sistema PCM capita proprio questo, solo che l'altezza non viene indicata in cifre decimali come su una scala normale, ma quale sequenza di valori 0 e 1 (fig. 2). Ciò è particolarmente vantaggioso perché il valore 0 può significare per esempio non corrente, non tensione o non luce, 1 può significare corrente, tensione, risp. luce o, nella nostra immagine, asta sì, risp. asta no. In una descrizione puramente duale importa solo la presenza, risp. l'assenza di una grandezza fisica e non la sua potenza. Con i valori 0 e 1 si può contare progressivamente come nel sistema decimale solo che in questo caso il valore posizionale non è 10 ma 2. Cominciamo dalla fine; se l'ultima cifra è 0, ciò significa, come in ogni altra posizione, 0; se l'ultima cifra è 1, ciò significa, come nel sistema decimale, 1. Al penultimo posto 0 significa, come già detto, 0; 1 invece non significa più 1 ma, dato che si trova in penultima posizione, 2. Un 1 seguito da due cifre corrisponde a 4 nel sistema decimale, un 1 seguito da 3 cifre corrisponde a 8 o, se passiamo alla regola un 1 seguito da x cifre corrisponde a  $2^x$  nel sistema decimale. Per i segnali di telefonia sono utilizzate sequenze di 8 posizioni occupate con i valori 0 o 1. Per sapere qual è la cifra massima del sistema decimale che possiamo rappresentare in questo modo, dobbiamo dapprima occupare le 8 posizioni con 1; otteniamo quindi i seguenti valori da sommare:  $2^7 + 2^6 + 2^5 + 2^4 + 2^3 + 2^2 + 2^1 + 2^0 = 128 + 64 + 32 + 16 + 8 + 4 + 2 + 1 = 255$  e se vi aggiungiamo anche lo 0 (8 posizioni con 0) vediamo che con un ottetto di 0 e 1 possiamo esprimere 256 livelli diversi di misura. Ricordiamoci ora degli spazi nello steccato. Al posto di un'asta di una determinata altezza e di un intervallo di 125  $\mu\text{s}$  fino alla prossima asta può essere inserito un ottetto di 0 e 1. Ciò significa che ogni 125:8  $\mu\text{s}$  risp. ogni 1000:64  $\mu\text{s}$  bisogna trasmettere uno 0 o un 1. Arriviamo così alla conclusione che una conver-

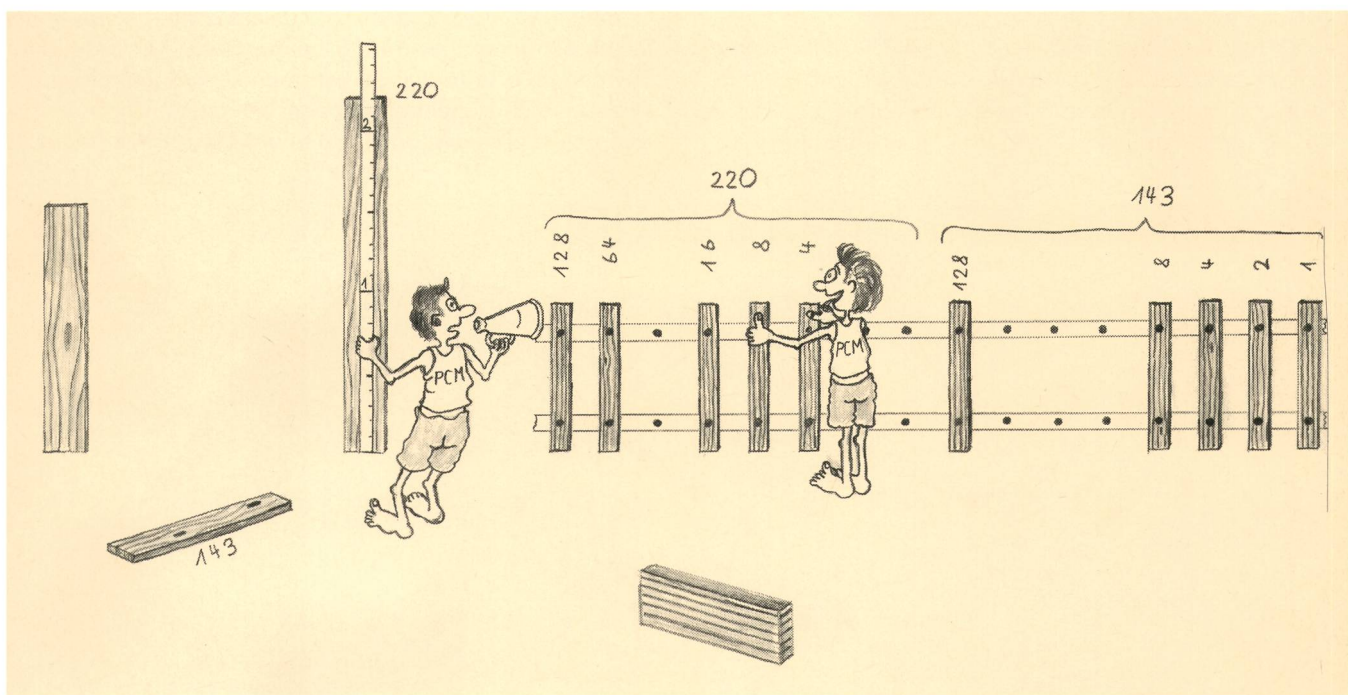


Fig. 2  
Passage de la modulation par impulsions en amplitude (PAM) à la modulation par impulsions et codage (MIC) - Passaggio dalla modulazione a impulsi in ampiezza (PAM) alla modulazione a impulsi in codice (PCM)

sentation binaire, seule l'absence ou la présence d'une grandeur physique et non son intensité sont des critères significatifs. Comme dans le système décimal, on peut en effet compter pas à pas uniquement avec des 0 et des 1, à la différence que la référence n'est pas 10 mais 2. Pour plus de clarté, commençons nos explications en analysant le nombre binaire par la fin, c'est-à-dire de droite à gauche. Si le dernier chiffre est 0, cela signifie également 0, comme si ce symbole se trouvait à une autre position du nombre. Une valeur 1 signifie que la dernière position du nombre est également 1 dans le système décimal. A l'avant-dernière position, 0 signifie comme nous venons de le dire 0, alors que 1 n'est plus 1, mais 2, parce que cette valeur occupe l'avant-dernière position. Un 1 suivi de deux chiffres est alors équivalent à 4 dans le système décimal, un 1 suivi de trois chiffres est identique à 8 ou, exprimé autrement, un 1 suivi de x chiffres a la même valeur que  $2^x$  dans le système décimal. Pour les signaux de téléphonie, on utilise des groupes de 8 éléments binaires 0 ou 1 (on parle d'octets). Si nous voulons savoir à quelle valeur cette série d'éléments binaires correspond dans le système décimal, il faut tout d'abord remplacer les 8 positions par des 1, puis tout simplement les additionner:  $2^7 + 2^6 + 2^5 + 2^4 + 2^3 + 2^2 + 2^1 + 2^0 = 128 + 64 + 32 + 16 + 8 + 4 + 2 + 1 = 255$  et, si nous considérons que le 0 (8 positions occupées par des 0) s'y ajoute, nous pouvons constater qu'un octet composé de 0 et de 1 permet de représenter 256 paliers de mesure. Souvenons-nous maintenant de notre palissade composée de lattes séparées par des interstices. Au lieu d'une latte d'une certaine hauteur, on peut insérer dans un interstice de  $125 \mu\text{s}$  un octet de «0» ou de «1». Cela signifie alors qu'il s'agit de transmettre un 0 ou un 1 toutes les  $125:8 \mu\text{s}$  ou  $1000:64 \mu\text{s}$ . Nous pouvons en conclure qu'une conversation téléphonique ayant une limite de fréquences supérieure de 4000 oscillations peut être transmise par 256 paliers d'amplitude si l'on dispose d'un canal de transmission de 64 000 bit/s.

La palissade se compose donc de 64 000 places pour des mêmes lattes, 8 d'entre elles représentant toujours la valeur momentanée du signal sous forme binaire. A l'état de repos complet, toutes les places sont libres (sé-

sazione telefonica con una frequenza superiore di 4000 oscillazioni può essere trasmessa a 256 livelli di volume se disponiamo di un canale di trasmissione di 64 000 bit/s.

Lo steccato ha dunque 64 000 posizioni per aste sempre uguali, 8 delle quali riproducono, in forma duale, un valore momentaneo di segnale. In stato di quiete totale tutti i posti sono liberi (0), in caso di livello massimo del segnale invece tutti i posti sono occupati con valori 1.

Perché i segnali di tipo digitale sono particolarmente insensibili ai disturbi? Nel nostro steccato digitale tutte le aste hanno la stessa altezza e si trovano o non si trovano in punti ben precisi a seconda dell'intensità del segnale. Nel caso in cui 1 abbia un valore troppo alto o troppo basso, è facile trasmettere un nuovo segnale campione, basta essere sicuri dell'esistenza di un segnale in quel preciso momento. A tal fine si impiega un dispositivo che controlla se in un determinato momento un segnale supera un valore prefissato. Se ciò è il caso, viene trasmesso un nuovo segnale campione, indipendentemente dalla grandezza effettiva del segnale registrato. Se invece, nel momento considerato, il livello del segnale si trova sotto il minimo, non viene trasmesso nessun segnale. Fino all'altezza del valore minimo i rumori sono dunque completamente soppressi. I segnali disturbati che si trovano sopra il livello minimo vengono invece rigenerati. Non solo si può ristabilire in un secondo tempo l'altezza del segnale, ma anche il bit originario può essere rigenerato se il segnale perviene sfasato e modificato, dato che la sua forma e la sua posizione sono definite con precisione. Per illustrare quanto detto, dimostriamo anche questa volta l'affermazione con un'immagine (fig. 3). Le aste che non hanno la lunghezza desiderata o che sono troppo larghe possono essere sostituite facilmente e lo steccato nuovo non differisce più da quello originale. Tutte le posizioni occupate da aste devono però essere conosciute, e quelle non occupate devono essere effettivamente vuote.

Un altro vantaggio della digitalizzazione risiede nella forma semplice e uniforme del segnale. Abbiamo visto che con un ottetto di 0 e 1 possono essere trasmessi 256 livelli di misura; nel nostro caso 256 diversi valori di corrente nella bobina d'eccitazione della capsula telefonica.

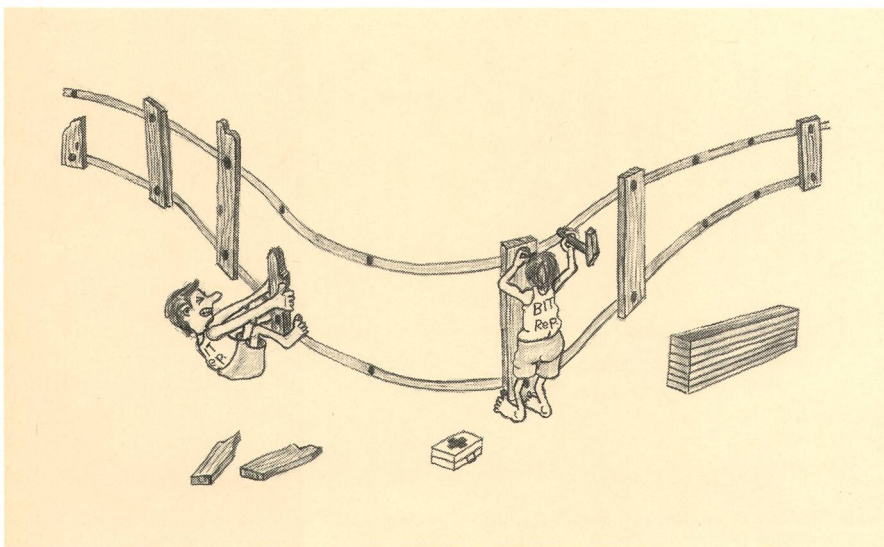


Fig. 3

Un signal MIC perturbé peut être entièrement régénéré, aussi longtemps que les impulsions déformées sont identifiables - Un segnale PCM disturbato può essere rigenerato completamente se i singoli impulsi mutilati sono ancora identificabili

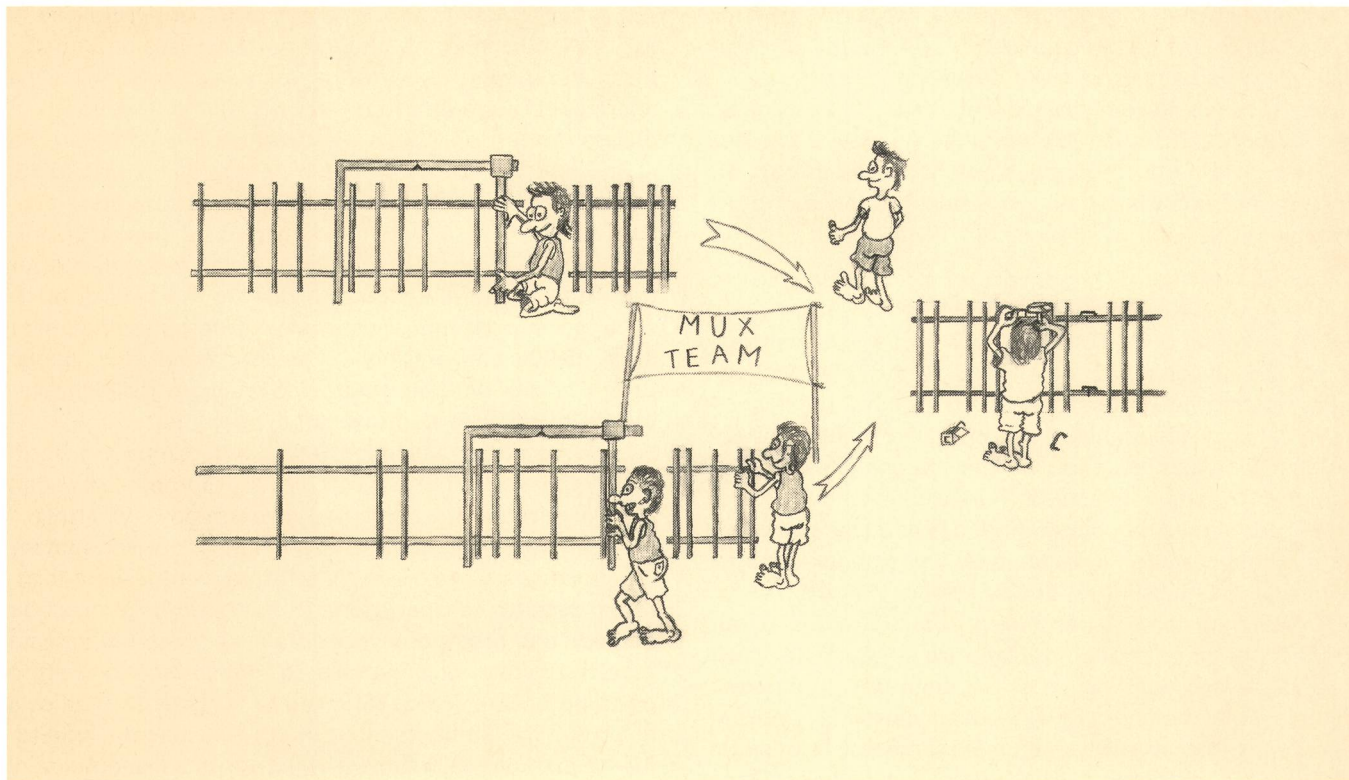


Fig. 4  
 Dans le multiplexage, divers débits binaires ( $x$ ) sont imbriqués dans le temps. A cet effet, les signaux sont comprimés dans la proportion  $1/x$  (dans notre cas  $1/2$ ) et transmis alternativement dans un nouveau débit binaire (à droite) avec une alternance dans le temps d'un octet comprimé de moitié du débit supérieur et du débit inférieur représentés à gauche sur l'image. Il est ainsi possible de transmettre simultanément les signaux de  $x$  canaux (ici 2) - Nel multiplex temporale diverse ( $x$ ) correnti di bit vengono intercalate l'una nell'altra. I segnali vengono compressi a  $1/x$  (nell'esempio  $1/2$ ) e alternativamente raggruppati in una nuova corrente di bit. Nel nostro caso la nuova corrente di bit (a destra) contiene sempre alternativamente un otetto, compresso alla metà del tempo, della corrente di bit superiore e di quella inferiore sul lato sinistro. E' così possibile trasmettere assieme i segnali di  $x$  canali (qui 2) (Disegni: Peter Herzig, Berna)

rie de zéros), à l'état du niveau maximal du signal, toutes les places sont occupées par des 1.

Pourquoi un signal numérique résiste-t-il particulièrement bien aux perturbations? Il est manifeste que dans notre palissade «numérique» toutes les lattes ont la même hauteur et qu'elles existent ou n'existent pas à un endroit précis, selon le volume du signal. Si un «1» devait parvenir avec une valeur trop élevée ou trop basse, il est facile de retransmettre une nouvelle valeur normalisée, à condition que l'on sache avec certitude qu'un signal existe à ce moment-là. Il s'agira donc de créer un dispositif capable de contrôler la présence ou l'absence de signal à un moment précis, c'est-à-dire d'un signal dépassant une valeur prescrite. Si tel est le cas, on retransmet un nouveau signal normalisé, indépendamment de la valeur effective du signal perçu. En revanche, si le niveau du signal à l'instant considéré se trouve au-dessous du minimum, aucun signal ne sera retransmis. Cela signifie que les bruits inférieurs à la valeur minimale sont entièrement supprimés. En revanche, les signaux altérés par une perturbation dont la valeur dépasse le minimum sont régénérés. Cependant, on ne se contente pas de «remettre de l'ordre» dans le domaine de l'amplitude des signaux, mais aussi dans celui du décalage temporel ou de la distorsion d'une forme du signal. Ici également, le «bit» original peut être régénéré, attendu que sa forme et sa position sont définies avec précision. Pour plus de clarté, transposons cette explication en une image (fig. 3). Lorsque les lattes n'ont pas

Naturalmente si può pensare anche a attribuzioni di altro genere, p. es. 255 segni diversi come lettere maiuscole e minuscole, inoltre segni di interpunzione e spazi o l'ordine di cominciare una riga nuova. Anche i segnali di immagini possono essere espressi in forma digitale e i computer si scambiano correnti di bit. La numerizzazione consente dunque di trasmettere in modo uniforme voce, musica, parola, immagine e dati. Ciò che per le diverse applicazioni deve essere specifico al servizio è l'interpretazione. Di diversa grandezza sono anche le correnti di bit necessarie: 64 000 bit/s per una conversazione telefonica oppure 140 milioni di bit/s per un'immagine a colori in movimento se la sequenza di bit necessaria non viene ridotta con dispositivi speciali. Giungiamo così a un altro dei vantaggi offerti dai segnali digitali: la relativa facilità con cui possono essere trattati. Quando vi è una quantità di bit corrispondente a un'immagine si può stabilire rapidamente quali bit cambiano effettivamente la loro posizione nella nuova immagine e quali non la modificano. Nel caso del videotelefono, che oltre al suono permette di trasmettere anche l'immagine, si dovrà trasmettere soprattutto il movimento delle labbra mentre il resto della testa e lo sfondo resteranno più o meno invariati. Si trovano già sul mercato apparecchi in grado di trasmettere queste immagini con soli 64 000 bit/s con un risparmio di 2000 volte rispetto ai 140 Mbit/s necessari per rigenerare tutta l'immagine. Naturalmente questi apparecchi sono molto cari e non sono ancora in grado di trasmettere nitidamente movimenti rapidi dell'immagine completa.

la longueur voulue, si elles sont trop larges ou que les vis ont un tel jeu qu'elles ne sont plus à leur place originale, elles peuvent facilement être échangées et la nouvelle palissade ne se distingue alors en rien de l'original, à condition que toutes les positions occupées par des lattes puissent être reconnues comme telles et que, inversement, aucune position non occupée ne soit prise par une latte.

Un autre avantage de la numérisation réside dans le fait que la forme du signal est simple et uniforme. Nous avons vu qu'un octet composé de 0 ou de 1 pouvait restituer 256 niveaux de mesure. Dans notre cas, 256 valeurs de courant différentes dans la bobine d'excitation de la capsule téléphonique d'écoute. Or, d'autres affectations sont bien entendu possibles, par exemple 255 signes différents, tels que des majuscules ou des minuscules, des signes de ponctuation, des espaces ou l'ordre de commencer une nouvelle ligne. Les signaux d'image peuvent eux aussi être numérisés et les ordinateurs échangent également des flux binaires. Grâce à la numérisation, on peut donc transmettre la parole, la musique, les textes, les images et les données d'ordinateur de la même manière. Ce qui, dans certaines applications, doit être spécifique à un système est la mise en valeur. Une différence existe aussi dans l'importance des flux binaires nécessités, par exemple 64 000 bit/s pour une conversation téléphonique, mais environ 140 millions de bit/s pour une image en couleurs animée, lorsqu'il est impossible de diminuer la rapidité du train binaire nécessaire au moyen de dispositifs spéciaux. Un autre avantage des signaux numériques devient maintenant évident, à savoir la possibilité de les traiter de manière relativement simple. On peut, par exemple, dans un ensemble de bits représentant une image, décider facilement quel bit change réellement de place en présence d'une nouvelle image et quel bit appartient encore à l'ancienne. Ainsi, dans un visiophone, par exemple, où il s'agit non seulement de transmettre le son mais aussi l'image du correspondant, l'élément significatif est surtout le mouvement des lèvres, alors que la position de la tête et l'état de l'arrière-plan restent plus ou moins identiques. Il existe déjà dans le commerce des appareils capables de transmettre une telle image avec un débit de 64 000 bit/s seulement, par rapport à une image entièrement régénérée nécessitant 140 Mbit/s, d'où une économie correspondant à un facteur de plus de 2000. Il faut cependant préciser que de tels équipements sont encore très coûteux et qu'ils ne sont pas en mesure de restituer avec netteté des changements rapides de l'état d'une image.

Pour terminer, encore une petite explication sur un terme technique le multiplex(age) (fig. 4). Nous avons vu, en examinant l'exemple d'une conversation téléphonique, qu'une valeur de signal doit pouvoir être transmise en l'espace de 125  $\mu$ s. A cet effet, un octet de «0» ou de «1» est nécessaire. On peut soit transmettre ces

Per concludere, un ulteriore concetto: la moltiplicazione (fig. 4). Abbiamo visto che in una conversazione telefonica un segnale deve essere trasmesso entro 125  $\mu$ s e che è necessario un ottetto di 0 e di 1. Gli 8 bit possono essere ripartiti sui 125  $\mu$ s o susseguirsi rapidamente. Se si impiega solo la metà del tempo disponibile, rimane il posto per un altro ottetto di una seconda conversazione. Su fibre ottiche è possibile trasmettere più di un miliardo di bit al secondo senza amplificatori intermedi per decine e decine di chilometri. Con un miliardo di bit al secondo si possono trasmettere contemporaneamente circa 15 000 conversazioni. L'accoppiamento di questi ottetti in una centrale telefonica e il loro disaccoppiamento in un'altra centrale sono però operazioni assai complesse, dato che gli ottetti devono essere inseriti nella rapidissima corrente di bit ed esserne estratti con la stessa frequenza affinché il cliente riceva gli ottetti a lui destinati. Ovviamente ha un'importanza fondamentale la cadenza alla quale gli ottetti devono essere inseriti ed estratti. La ripartizione esatta di un miliardo di bit richiede una precisione superiore a  $10^{-9}$  secondi; questa tecnica digitale funziona solo se i cambiamenti di stato possono essere realizzati in modo veramente rapido: a una velocità inimmaginabile e tuttavia ancora infinitamente distante dalla funzione matematica discontinua. Il detto latino: «natura non saltat» vale ancora.



8 bits répartis sur 125  $\mu$ s très rapidement, soit les distribuer sur cette durée. Si nous n'utilisons que la moitié du temps disponible, par exemple, nous avons suffisamment de place pour un autre octet rattaché à une deuxième conversation. A l'aide des fibres optiques, il est possible de transmettre plus de 1 milliard de bit/s sans amplification intermédiaire à des distances de plusieurs douzaines de kilomètres. Or, avec 1 milliard de bit/s, on peut transmettre simultanément environ 15 000 conversations téléphoniques. Assembler ces octets dans un central téléphonique et les séparer à nouveau dans un autre sont cependant des tâches difficiles, attendu que les octets doivent être définis dans ce flux binaire à haute vitesse pour qu'il soit possible de les prélever à nouveau au moment voulu et de les acheminer vers l'utilisateur auquel ils sont destinés. Il s'est révélé que la cadence à laquelle les octets sont insérés et prélevés joue manifestement un rôle décisif. Pour répartir un milliard de bits avec une précision d'un bit, la précision temporelle doit être meilleure que  $10^{-9}$  seconde. Il est clair que la technique numérique ne fonctionne que si les modifications d'état peuvent être réalisées très rapidement. Bien que cette variation soit d'une rapidité difficile à concevoir, elle est encore très éloignée de la fonction mathématique du «saut». L'adage: Natura non saltat (la nature ne fait pas de sauts) demeure donc valable.