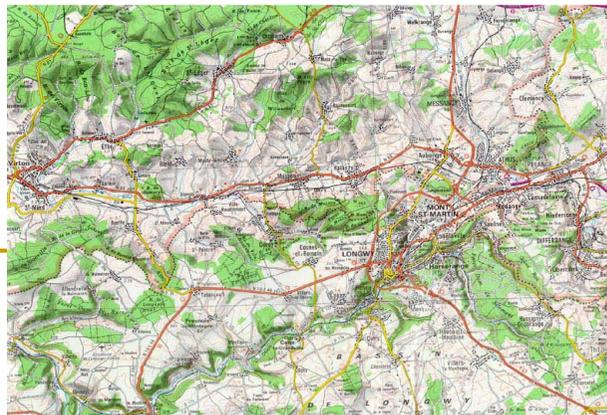
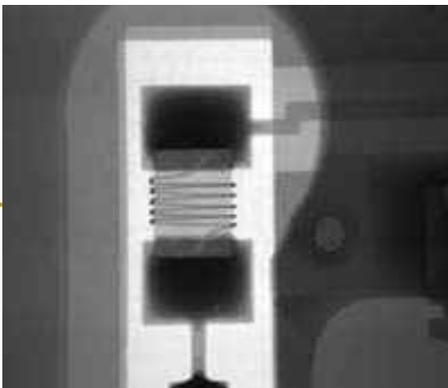
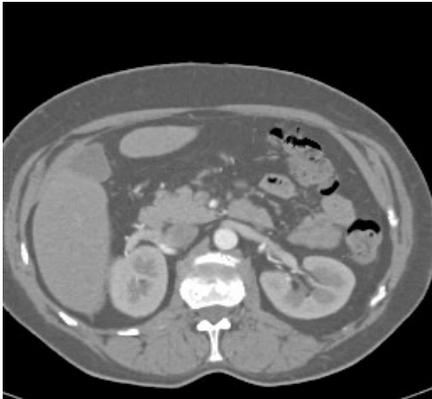
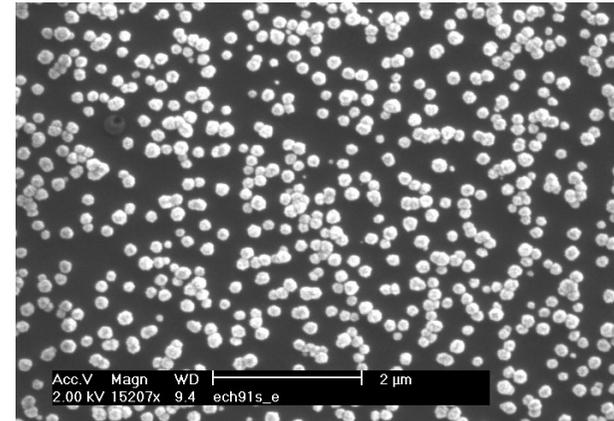




Outils pour le traitement et l'analyse d'images

- Notions de base
- Bases du traitement du signal
- Échantillonnage, reconstruction
- Filtrage, convolution
- Filtres simples de réduction de bruit

Image... Images !



ALPHABET BALI .

ca	khá	ka	ga - nga	teha	chá	teha	teha	ya	ta
thá	tha	da	na	ta	thá	tha	da	na	pa
ppa	lu	mi	ca	ra	la	ua	ta	ha	la

Exemple d'une Consonne avec les Voyelles et les Diphthongues

ka	kaa	ki	ku	kou	koi	ke	kai	ko	kou	kam	ka
ka-na	ka-ná	ka-n	ka-na	ka-nou	ka-nou	ka-né	ka-nai	ka-nó	ka-nou	ka-nang	ka-ní

Les Chiffres é amow.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

Une image cela peut être...

- La cartographie d'une **grandeur physique mesurée** (*Photographie, radiographie, microscopie électronique*)
- ... ou **reconstruite** (*Scanner, IRM, Radar, sonar, échographie*)
- Une **représentation planaire** d'une scène ou d'un objet
 - De nature intrinsèque **3D** (*Peinture, dessin, carte*)
 - Ou **2D** (*écrit, plan, schéma*)

« Un ensemble de données collectées à partir d'un phénomène continu ou discret afin de proposer une entité observable à l'œil humain »

➤ Nature image + application → modèle d'image et outils

- En général : support dans \mathbb{R}^N pour des données à valeurs dans \mathbb{R}^M
 - Dans ce cours, on se restreint à $N=2$ (images planaires), et $M=1$ (niveaux de gris)

Pourquoi traiter une image ?

- Remplacer l'observateur humain par une machine
 - Grand volume de données à traiter
 - Subjectivité de l'observateur
 - Complexité croissante des données
 - Utilisation de modèles (mathématique, physiques, géométriques, statistiques...)
 - ...
- Différentes appellations...
 - Traitement d'images
 - Analyse d'images
 - Vision par ordinateur... pour une même activité à la base

Un jeu d'enfant...



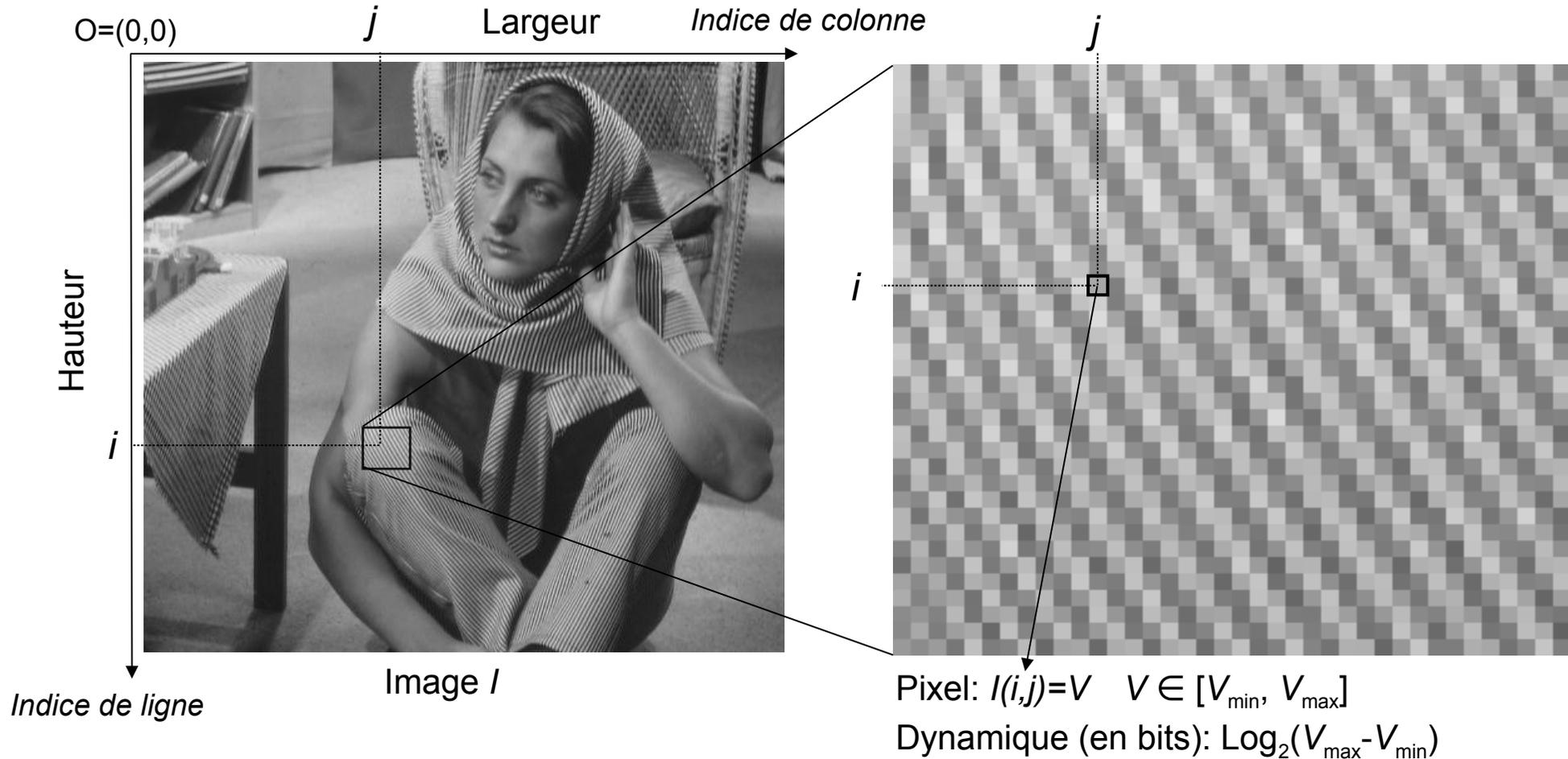
Traitement d'images

- Quatre grandes étapes de l'analyse d'images
 - Numériser: échantillonner et quantifier
 - Extraire les informations pertinentes au regard de l'application
 - Traiter ces informations
 - Les interpréter

 - Deux sortes de traitements
 - Bas niveau
 - Pas de compréhension de ce que représente l'image
 - Attachés aux valeurs de l'image
 - Données numériques
 - Haut niveau
 - Associés à une représentation de la réalité sous-jacente à l'image
 - Données symboliques

 - Thèmes abordés aujourd'hui
 - Notions de base – représentation informatique
 - Du continu au discret : bases du traitement du signal
-

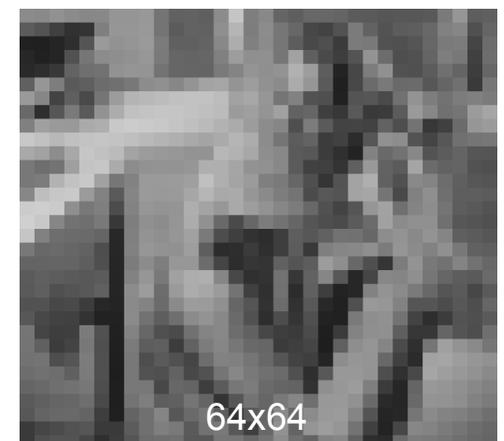
Notions de base



- Image représentée par une matrice avec un certain type de données (octet, entier, double): V_{\min} =noir (0), V_{\max} =blanc (255)

Notions de base (2)

- **Définition spatiale** : échantillonnage (nombre de pixels : largeur x hauteur)



- **Définition tonale**: quantification (nombre de niveaux de gris : dynamique)



- **Résolution spatiale** : taille du pixel (en mètres...) → scanner, images 3D
- **Résolution tonale** : plus petite différence de niveau de gris

Image couleur



=



Rouge

Vert

Bleu

Liens avec le traitement du signal (TDS)

- Historique
 - Élaboration intuitive des premiers traitements (opérateurs locaux=filtres)
 - TDS bien maîtrisé → transcription naturelle à l'image

 - Acquisition d'image
 - Souvent numérisation d'un phénomène continu
 - Emploi des systèmes électroniques bien modélisés en TDS

 - Attention
 - L'image ne se réduit plus aujourd'hui à un signal
 - Explosion de nouveaux types d'images, et notamment des techniques d'acquisition
 - Développement de méthodes spécifiques à l'image (ex: morphologie mathématique)
 - Des liens forts pour le bas niveau mais également des différences
 - Le passage signal → image se fait en remplaçant le temps par l'espace
-

Introduction à l'échantillonnage (1)

Exemple d'aliasing

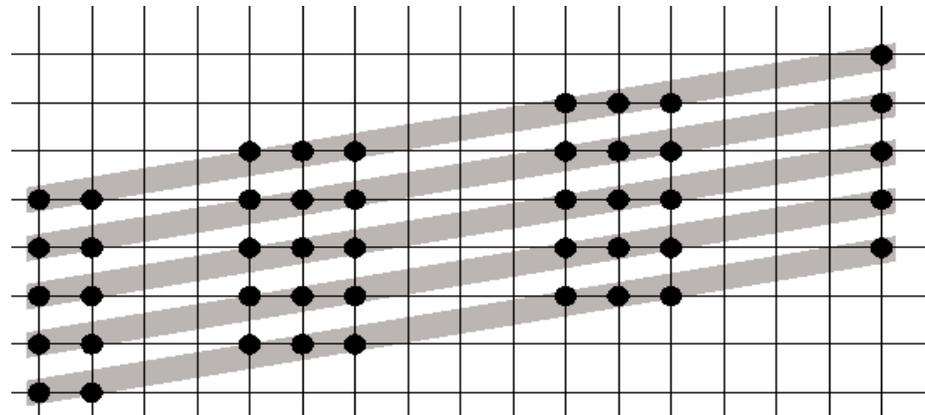


Les bandes changent de direction et d'épaisseur:
aliasing=distorsion dans le signal due à une fréquence d'échantillonnage trop faible

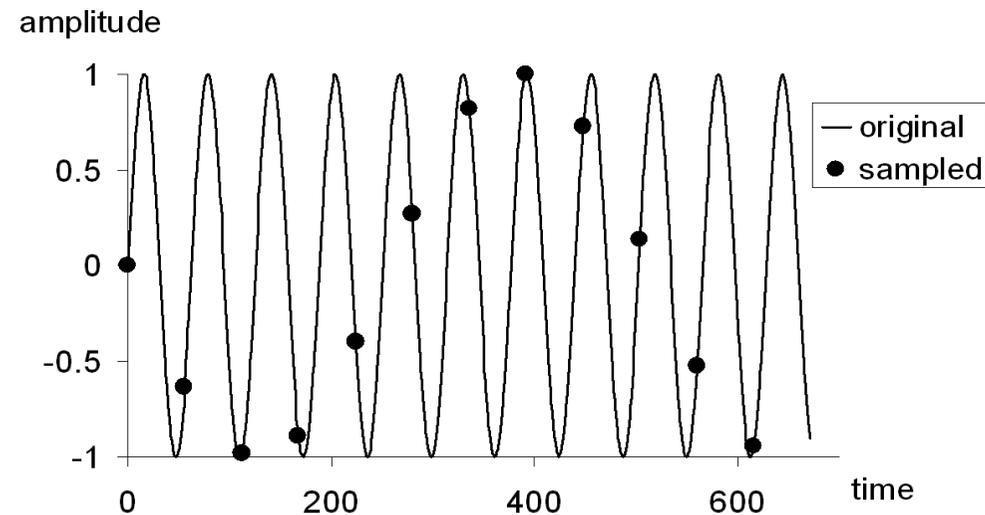
Introduction à l'échantillonnage (2)

Exemple d'aliasing

■ Image:



■ Signal:



Signal

- Deux sortes de signaux
 - Signal déterministe:
 - peut être défini par une fonction $x(t)$ qui décrit très exactement l'évolution d'une grandeur en fonction du temps
 - x en général prise à valeurs complexes (signal électrique)
 - **Transformée de Fourier**
 - Signal aléatoire:
 - Peut être modélisé par une famille de variables aléatoires indexée par le temps, chaque membre décrivant l'aspect incertain du phénomène observé à un temps donné
 - **Méthodes stochastiques**
 - Signal en pratique
 - Somme d'un **signal déterministe** qui contient l'information, et d'un **signal aléatoire** qui modélise le bruit
-

Signal déterministe

- Énergie d'un signal

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt$$

si $0 < E < +\infty$, signal d'énergie finie

- Puissance moyenne d'un signal

$$P = \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} |x(t)|^2 dt$$

si $0 < P < +\infty$, signal de puissance finie

- Relation
 - Si énergie finie, alors $P=0$
 - Si puissance finie, alors $E= +\infty$
- Énergie finie: modèle pour un signal réel
- Puissance finie: phénomènes stationnaires, signal périodique

Transformée de Fourier d'un signal à énergie finie

- Si $x(t)$ est à énergie finie, alors il appartient à l'ensemble L^2 (des fonctions de carré sommable).
- Sa transformée de Fourier $X(f)$ existe alors et appartient à L^2
- Formules directe et inverse

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \exp(-2\pi j f t) dt$$
$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) \exp(2\pi j f t) df$$

- Relation biunivoque (dualité) : autant d'information contenue dans l'espace du temps et l'espace des fréquences
- Théorème de Parseval: conservation du produit scalaire (isométrie)

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x(t) y^*(t) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) Y^*(f) df$$

- Corollaire ($x=y$): conservation de l'énergie

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{+\infty} |X(f)|^2 df$$

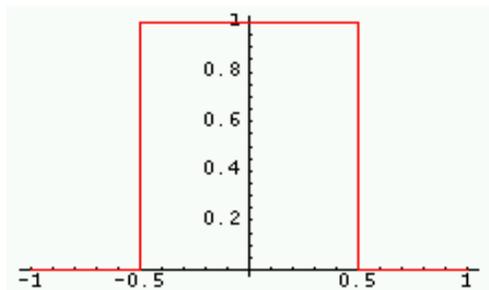
- $|X(f)|^2$ est la *densité spectrale d'énergie*, ou *spectre* du signal
- La transformée de Fourier d'un signal à valeurs réelles est paire (preuve par conjugaison)

Exemple de transformée de Fourier

- Fonction porte $x(t) = \Pi_T(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } |t| < T/2 \\ 0 & \text{si } |t| > T/2 \end{cases}$
- Ce signal étant réel, pair et d'énergie finie, sa transformée de Fourier est réelle et paire

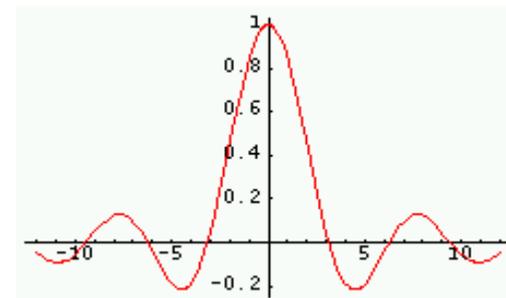
$$X(f) = \frac{\sin(\pi f T)}{\pi f} = T \operatorname{sinc}(\pi f T)$$

$\operatorname{sinc}(x) = \sin(x)/x$ est la fonction sinus cardinal ($\operatorname{sinc}(\pi x)$ s'annule pour les valeurs entières de x)



$\Pi_1(t)$

Durée finie (vs infinie)



$\operatorname{sinc}(f)$

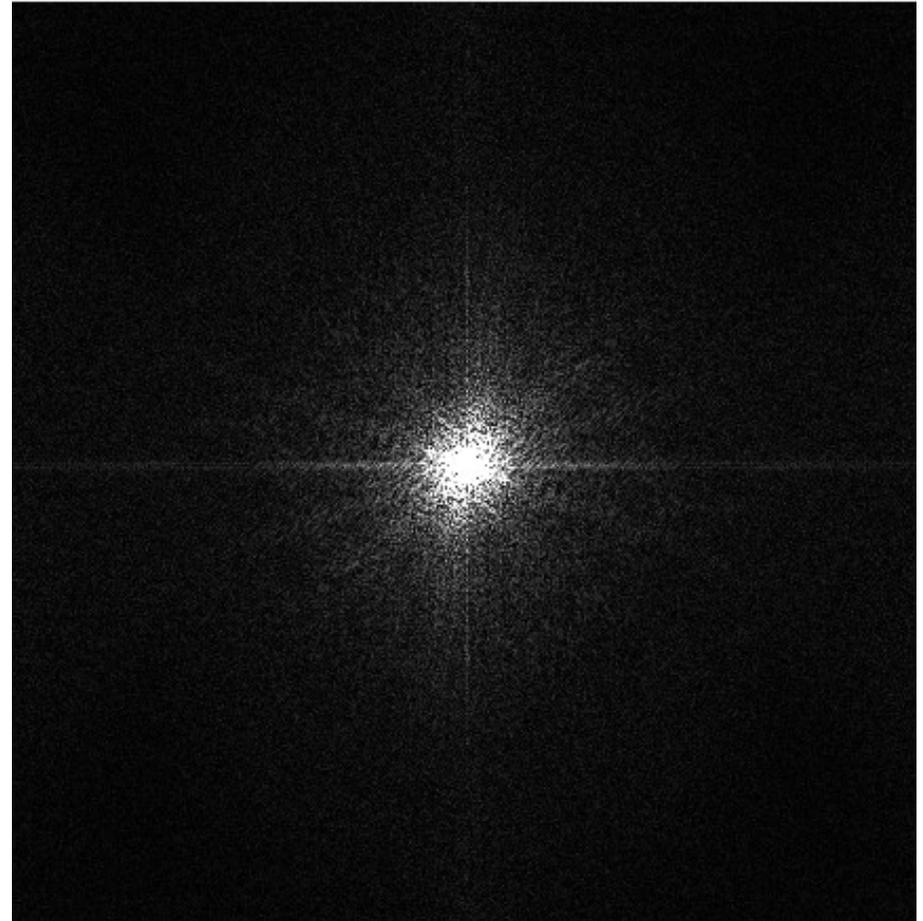
Bande illimitée (vs limitée)

Relation d'incertitude : produit durée par bande limité inférieurement

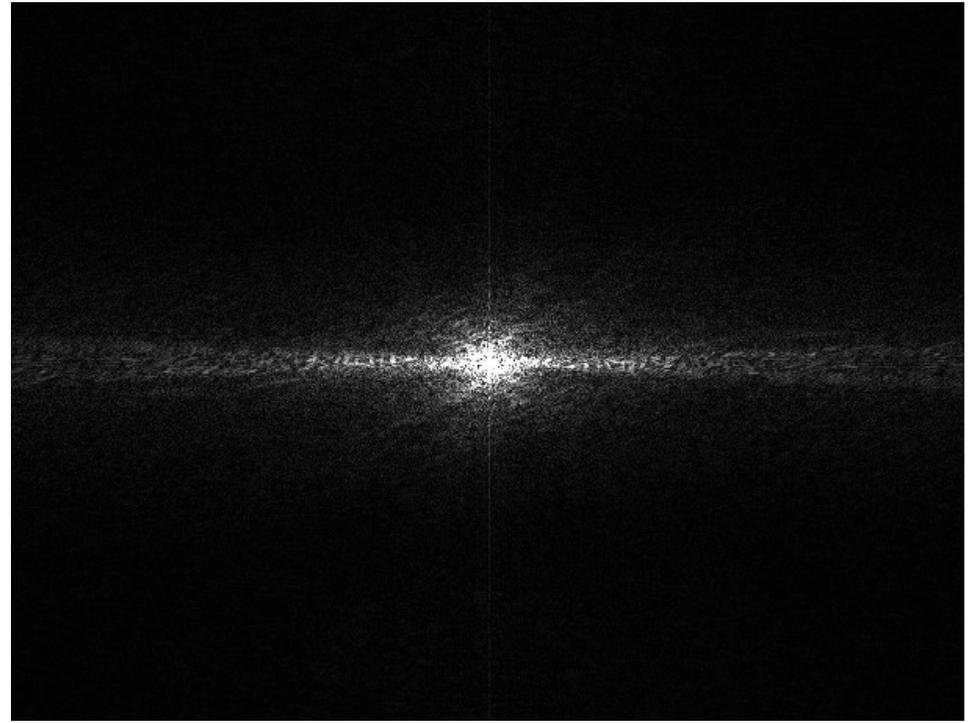
Intuitivement : un signal bref contient forcément des fréquences assez élevées

La fréquence est liée au taux de variation du signal

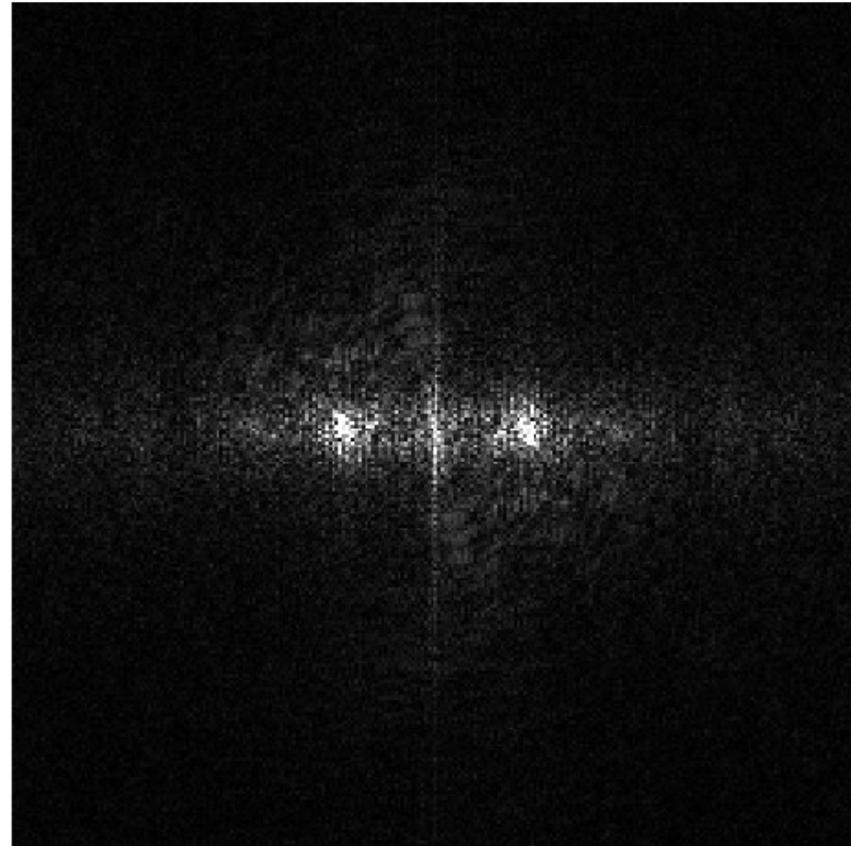
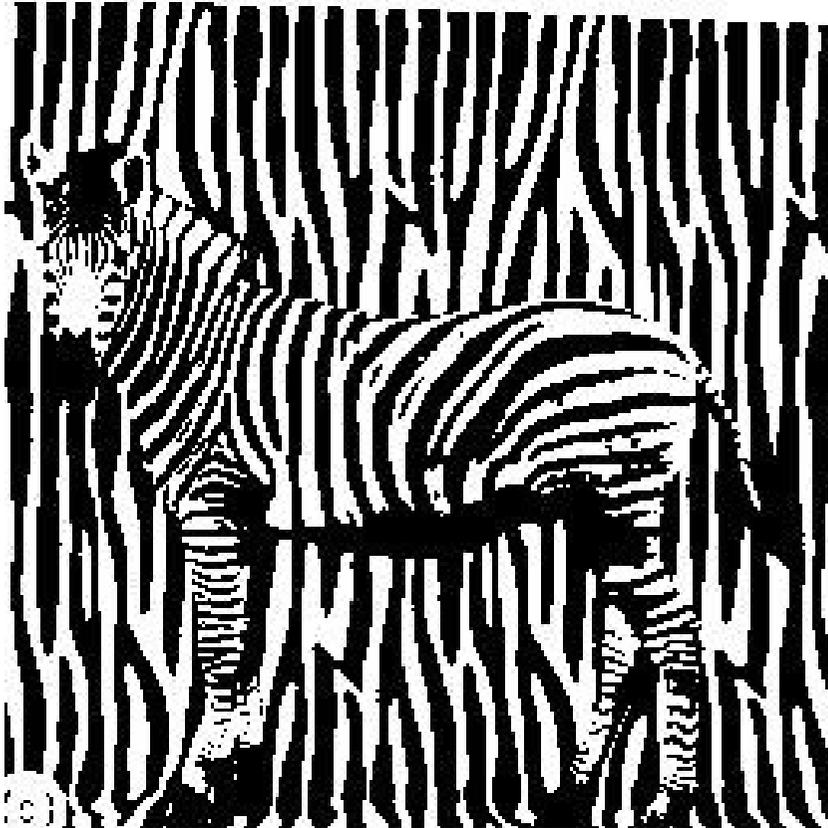
Intuition de la fréquence



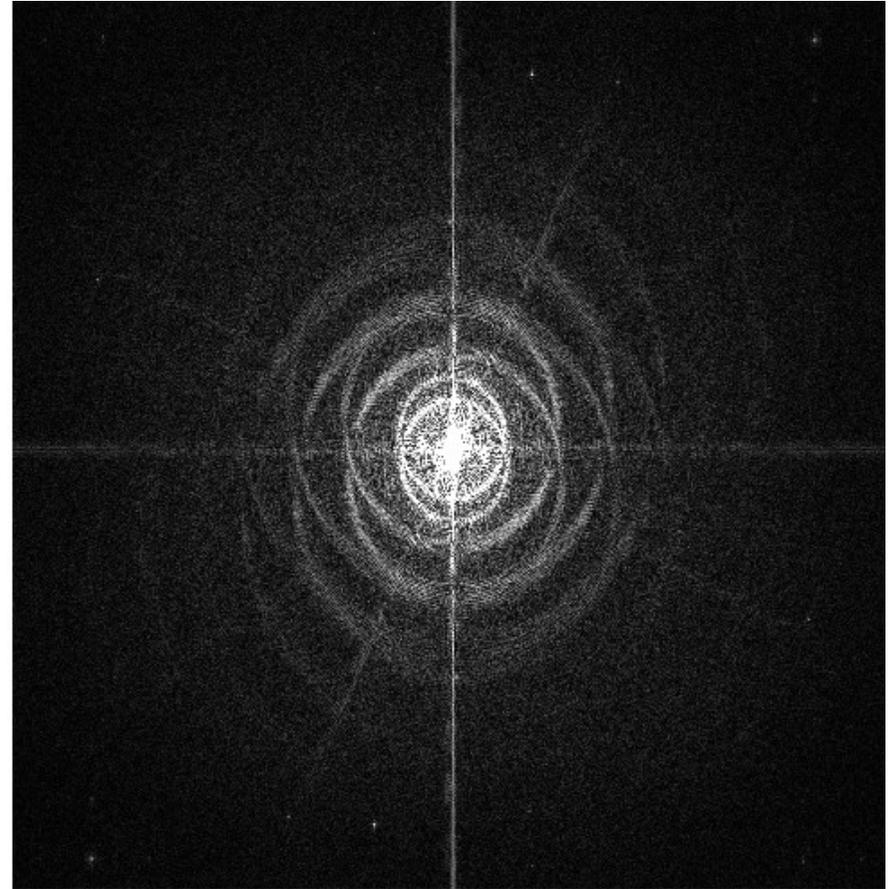
Intuition de la fréquence



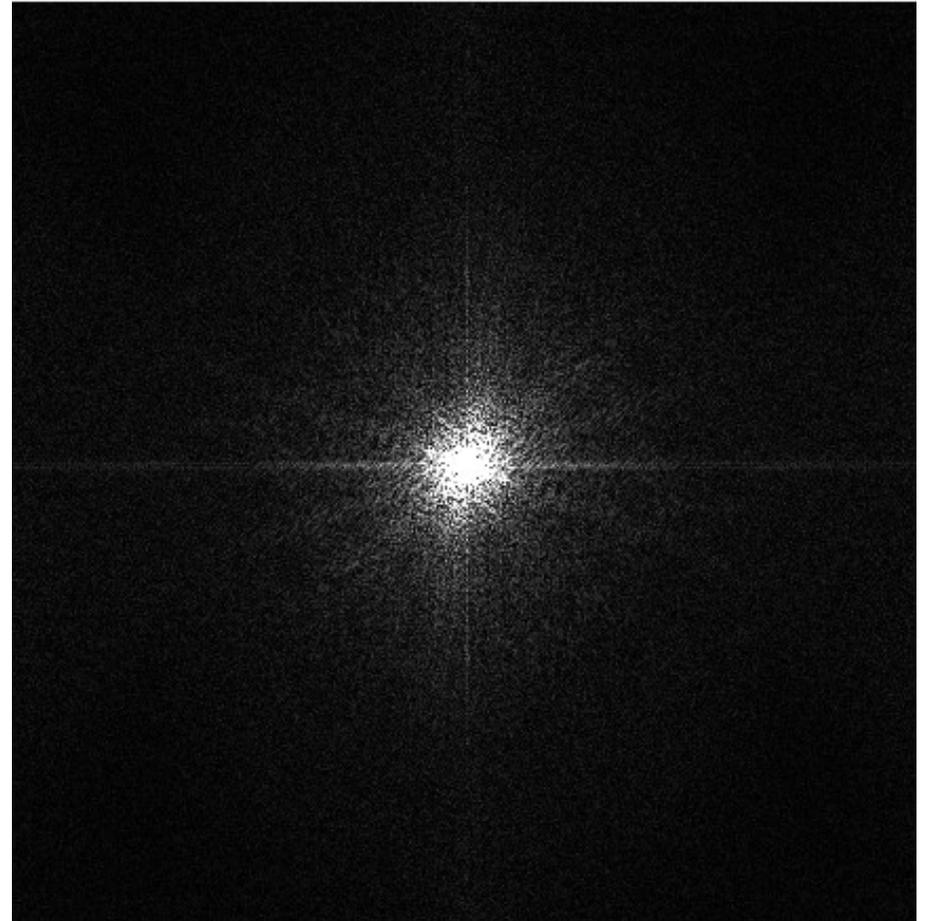
Intuition de la fréquence



Intuition de la fréquence



Intuition de la fréquence



Quelques propriétés de la TF

Propriété	Domaine temporel	Domaine fréquentiel	Interprétation physique
Similitude	$z(t) = x(at)$	$Z(f) = \frac{1}{ a } X\left(\frac{f}{a}\right)$	Compression-dilatation
Linéarité	$z(t) = ax(t) + by(t)$	$Z(f) = aX(f) + bY(f)$	
Translation	$z(t) = x(t - t_0)$	$Z(f) = X(f) \exp(-2j\pi f t_0)$	Retard temporel = variation de phase mais pas d'amplitude
Modulation	$z(t) = x(t) \exp(2j\pi f_0 t)$	$Z(f) = X(f - f_0)$	
Convolution	$z(t) = x(t) * y(t)$	$Z(f) = X(f) Y(f)$	Modélisation des filtres linéaires
Produit	$z(t) = x(t) y(t)$	$Z(f) = X(f) * Y(f)$	
Dérivations	$z(t) = x^{(n)}(t)$ $z(t) = (-2j\pi t)^n x(t)$	$Z(f) = (2k\pi f)^n X(f)$ $Z(f) = X^{(n)}(f)$	Transformation des équations différentielles à coefficients constants
Parité	$x(t)$ réelle	$\begin{cases} X(f) = X^*(-f) \\ \Im(X(f)) \text{ impaire} \\ \Re(X(f)) \text{ paire} \end{cases}$	Symétrie hermitienne
Conjugaison	$z(t) = x^*(t)$	$Z(f) = X^*(-f)$	

Propriétés des signaux à énergie finie

- Définitions:

- $x(t)$ est à *durée finie* si sa valeur est nulle en-dehors de $[t_0, t_1]$.
- $x(t)$ est à *bande limitée* si son spectre est nul en-dehors de l'intervalle de fréquences $[-B_1, B_2]$ ($=[-B, B]$ si $x(t)$ est réel puisque X est paire)
 - Dans ce dernier cas, B est la *bande* du signal

- Propriétés

- Relation d'incertitude : produit durée par bande limité inférieurement
 - Un signal de longue durée pourra avoir une faible largeur de bande, mais pas un signal bref
- Si $x(t)$ est d'énergie finie E , et à bande limitée B , alors le signal est borné

$$|x(t)| \leq \sqrt{2BE}$$

- (Théorème de Bernstein) si $x(t)$ est à bande limitée B et borné par M , alors les dérivées successives $x^{(n)}(t)$ vérifient

$$|x^{(n)}(t)| \leq (2\pi B)^n M$$

- Signification physique: un signal d'énergie finie (donc borné) et à bande limitée ne peut pas avoir des variations arbitrairement importantes
 - Lien étroit entre fréquence et variation de valeur (dérivée)

Convolution de deux signaux

- Soit $x(t)$ et $h(t)$ deux signaux, leur produit de convolution est la fonction définie par

$$(x * h)(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(u)h(t-u)du = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t-u)h(u)du$$

- Propriétés du produit de convolution:
 - Commutatif, associatif, distributif par rapport à l'addition
 - Existe toujours pour deux signaux d'énergie finie (inégalité de Schwartz)

$$\left| \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)h^*(t)dt \right|^2 \leq \int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt \int_{-\infty}^{+\infty} |h(t)|^2 dt$$

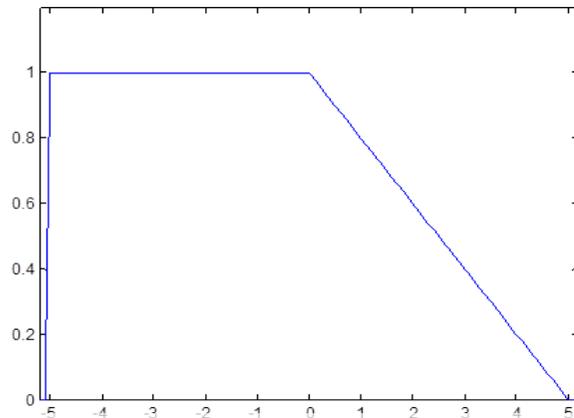
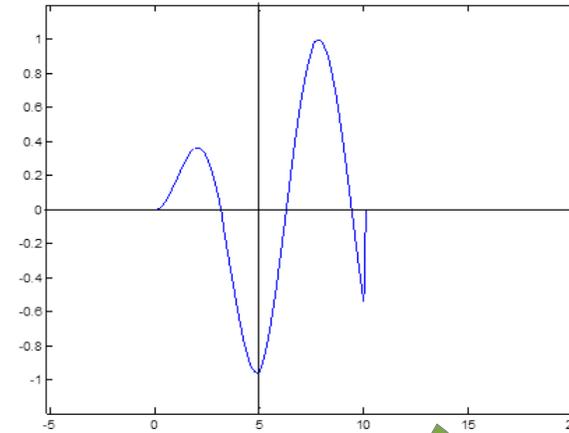
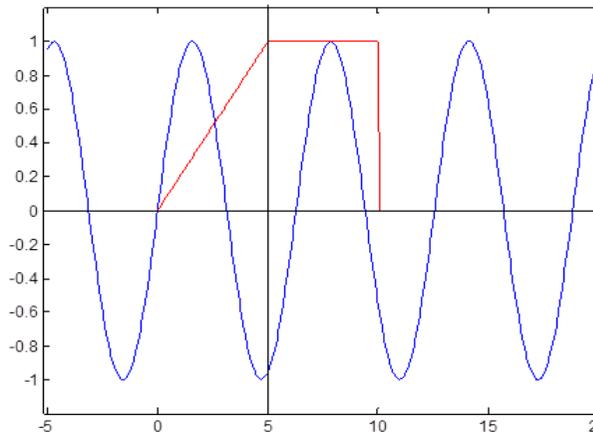
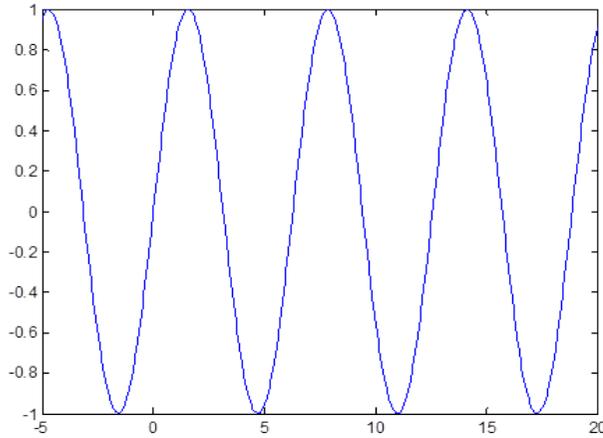
- Propriété fondamentale: la transformée d'un produit de convolution est le produit simple des transformées de Fourier

$$TF((x * h)(t)) = X(f)H(f)$$

Interprétation graphique

$$(x * h)(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(u)h(t-u) du$$

Signal d'entrée: $x(u) = \sin(u)$



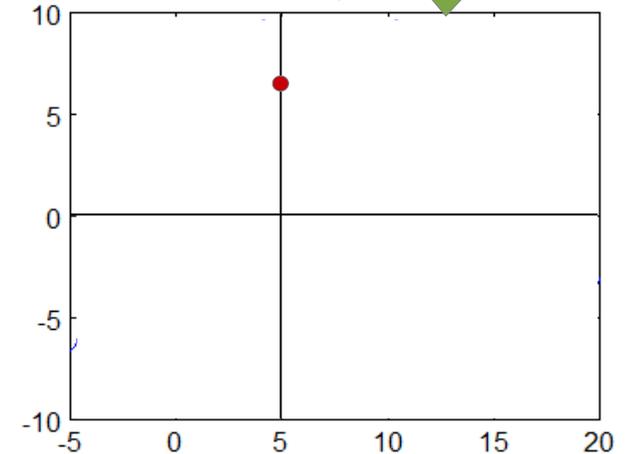
Réponse impulsionnelle:

- $h(t) = 1$ si $-5 \leq t \leq 0$
- $h(t) = 1 - t/5$ si $0 \leq t \leq 5$
- $h(t) = 0$ sinon

Symétrie par rapport
à l'origine et
translation en $t=5$:
 $h_t(u) = h(5-u)$



$y(5) = 6.1923$



Distribution de Dirac: δ

- Définition pour toute fonction x régulière
$$\int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \delta(t) dt = x(0)$$
 - Transformée de Fourier
$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) \exp(-2j\pi f t) dt = \exp(0) = 1$$

(inverse)
$$\delta(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(2j\pi f t) df$$

(signal sinusoïdal)
$$TF(\exp(2j\pi f_0 t)) = \delta(f_0 - f) = \delta(f - f_0)$$
 - Élément neutre de la convolution
$$\int_{-\infty}^{+\infty} x(t-u) \delta(u) du = x(t) * \delta(t) = x(t)$$
 - Translation
$$x(t) * \delta(t - t_0) = x(t - t_0)$$
 - Échantillonnage ponctuel
$$x(t) \delta(t - t_0) = x(t_0)$$
 - **Modélisation mathématique de la mesure d'un signal en un point**
-

Peigne de Dirac

- Définition

$$p_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT)$$

- Périodique donc développable en série de Fourier
 - Chaque coefficient vaut (admis, mais calcul simple)

$$c_k = \frac{1}{T}$$

- Nous avons donc

$$p_T(t) = \frac{1}{T} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \exp\left(2j\pi k \frac{t}{T}\right)$$

- Transformée de Fourier=peigne de Dirac

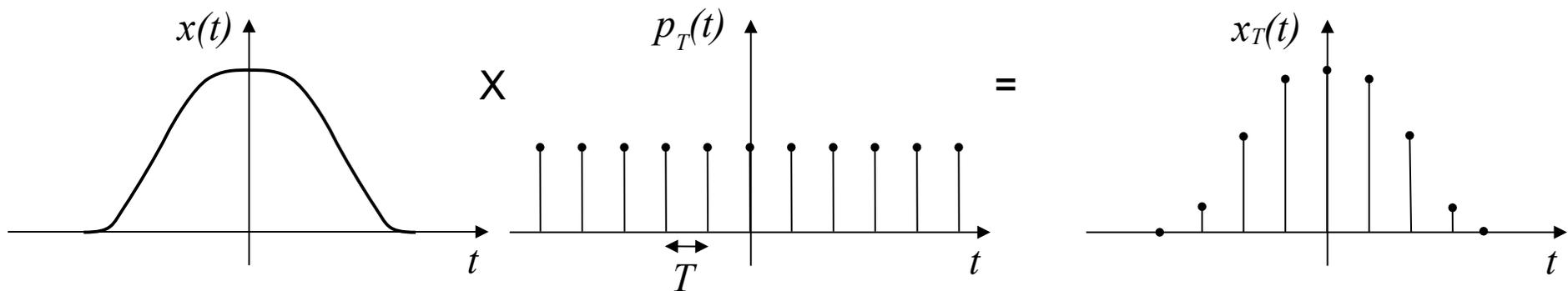
$$P_T(f) = \frac{1}{T} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta\left(f - \frac{k}{T}\right)$$

- **Modélisation mathématique de la numérisation d'un signal**

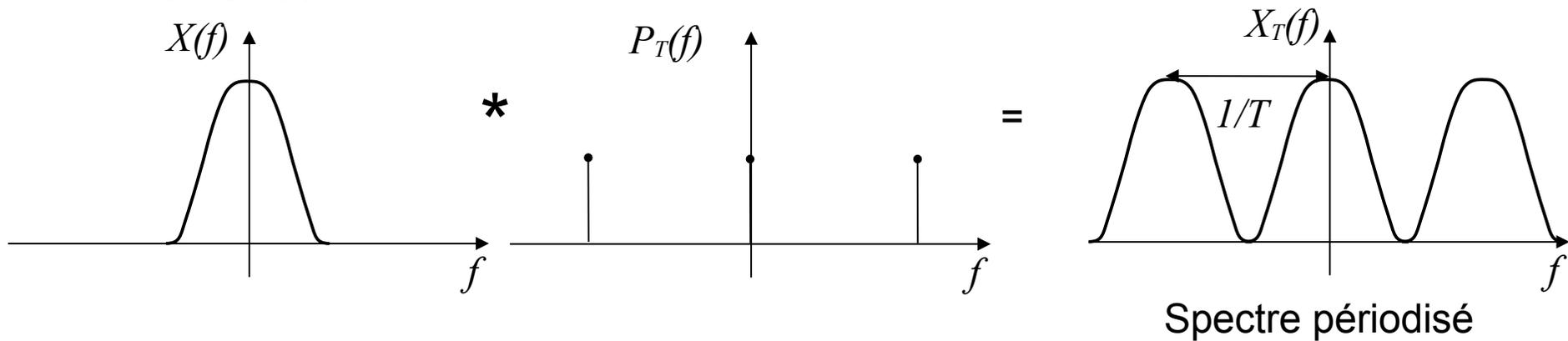
Peigne de Dirac (2)

- 2 propriétés importantes

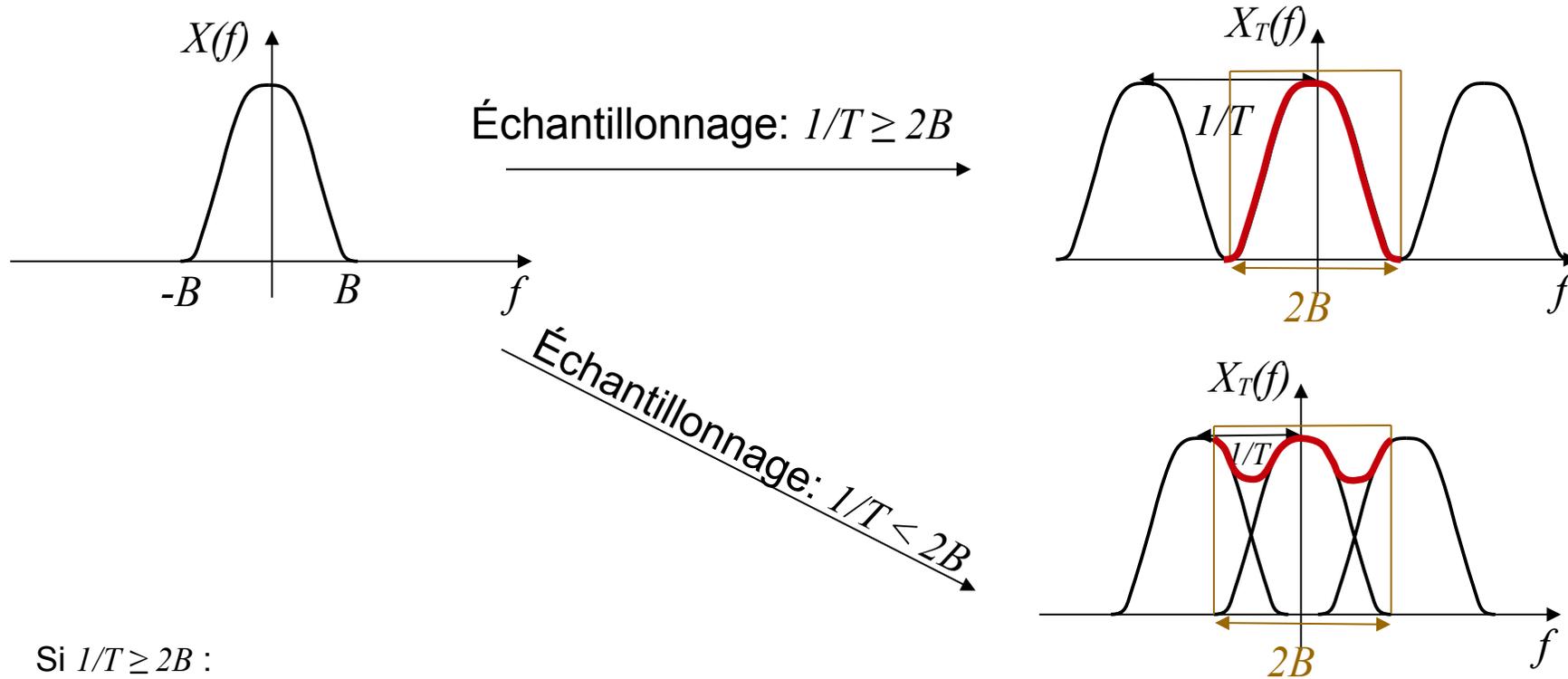
- Produit



- Convolution



Théorème d'échantillonnage



- Si $1/T \geq 2B$:
 - Le signal continu peut être reconstruit entièrement à partir du signal numérique suivant la formule d'interpolation de Shannon

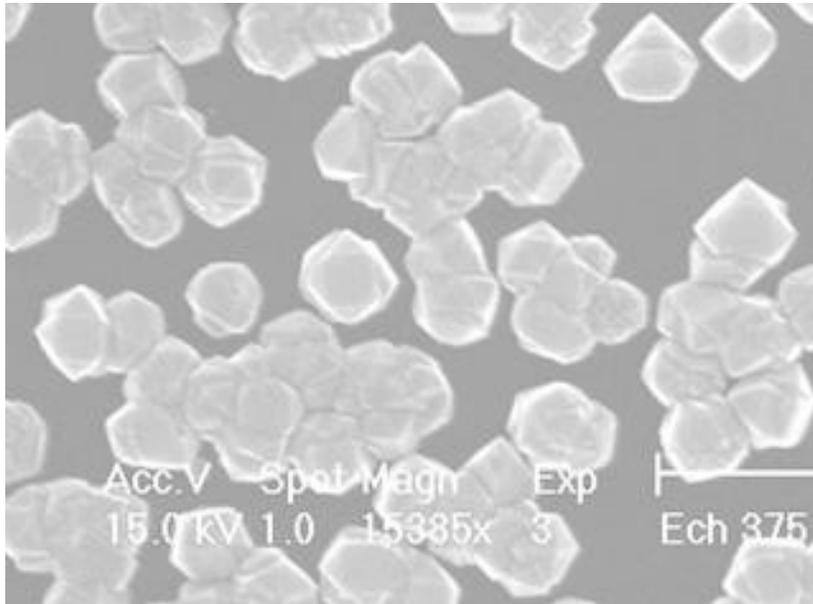
$$x(t) = T \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(nT) \frac{\sin(2\pi B(t-nT))}{\pi(t-nT)}$$

- $2B$ est appelé fréquence de Nyquist
- Si $1/T \leq 2B$:
 - Le phénomène de **recouvrement de spectre** empêche la reconstruction du signal
 - Des fréquences élevées sont ajoutées au signal original : aliasing

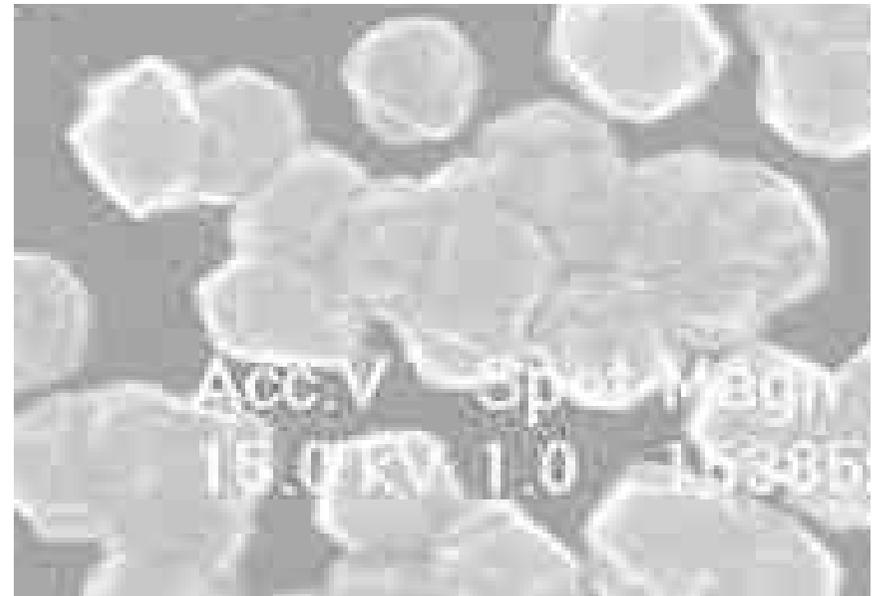
En résumé

- La numérisation d'un signal comporte deux volets
 - Échantillonnage (spatial)
 - Quantification (tonale) : pas vue ici → théorie de l'information
 - La théorie développée dans le cadre du traitement du signal permet de mieux comprendre les effets parfois indésirables consécutifs à la numérisation (aliasing)
 - Un signal (ou une image) peut se représenter dans le domaine temporel (spatial) ou fréquentiel grâce à sa transformée de Fourier
 - La notion de fréquence est étroitement liée au taux de variation du signal
 - Une discontinuité dans le signal est une fréquence à l'infini : il est donc impossible de la numériser correctement à coup sûr
 - **Phénomène de Gibbs**
 - Numériser une image
 - périodiser la transformée de Fourier
 - Reconstruction = produit par une fonction porte puis TF inverse
 - → convolution du spectre par un sinc (cf formule d'interpolation de Shannon)
 - → introduction de contenu fréquentiel à haute fréquence (si fréquence trop faible, inférieure à la fréquence de Nyquist)
 - Réduction de l'aliasing par périodisation spatiale ou répétition en miroir de l'image
 - On ôte les hautes fréquences visibles aux bords de l'image
-

Exemple pratique : le format jpeg

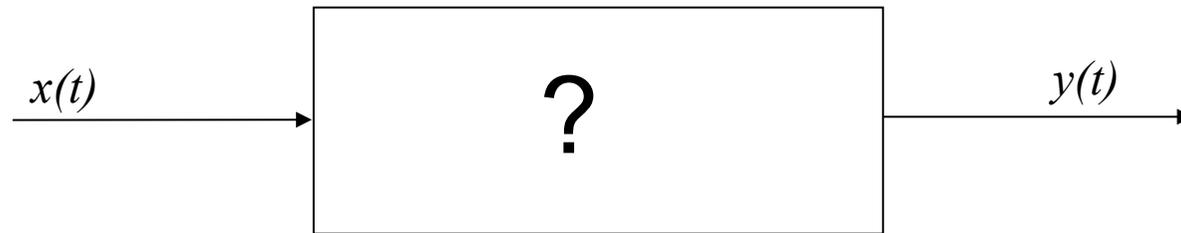


Compression à 85%



Compression à 25%

Filtrage linéaire



- Ce système est un filtre linéaire si la sortie est donnée par convolution du signal d'entrée avec une fonction h

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(u)h(t-u)du$$

- h est appelée *réponse impulsionnelle* du filtre
= réponse à une impulsion de Dirac en entrée :

$$h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(u)h(t-u)du$$

Filtrage linéaire d'un signal numérique

- Convolution pour un signal numérique: transcription de l'intégrale en somme

$$y_n = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x_k h_{n-k}$$

- Deux cas

- $\forall N > 0, \exists k > N \text{ ou } k < -N \text{ tq } h_k \neq 0$: filtre à réponse impulsionnelle infinie (RII).
Pas adressé dans ce cours.

- $\exists N > 0 \text{ tq } \forall k \in]-\infty, -N[\cup]N, +\infty[, h_k = 0$: filtre à réponse impulsionnelle finie (RIF)

$$y_n = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x_k h_{n-k} = \sum_{k=-N}^N x_{n-k} h_k = \sum_{k=-N}^N x_{n+k} h_{-k}$$

- Analyse locale du signal

Filtrage linéaire en 2D

- Filtre RIF en 2D

$$y_{i,j} = \sum_{n=-N}^N \sum_{m=-M}^M x_{i+n,j+m} h_{-n,-m}$$

- Interprétation

- On considère un pixel (i,j) de l'image en entrée
- On extrait une imagerie de taille (2N+1)x(2M+1) centrée en (i,j)
- On ajoute les pixels de cette imagerie en les pondérant par les $h_{-n,-m}$
- la valeur du pixel (i,j) en sortie est cette somme

- L'imagerie formée des $h_{n,m}$ est appelée noyau de convolution (ou kernel)

- Attention:

- La formule de convolution implique qu'une symétrie centrale est appliquée au noyau avant de faire le produit point à point

Exemple simple de convolution

$$y_{i,j} = \sum_{n=-N}^N \sum_{m=-M}^M x_{i+n, j+m} h_{-n, -m}$$

Image d'entrée autour
du pixel (i,j)

	j-1	j	j+1
i-1	3	4	1
i	9	6	5
i+1	7	8	2



	j-1	j	j+1
i-1	0	0	0
i	9	0	0
i+1	0	0	0



→ 9 = $y_{i,j}$

Valeur de l'image
en sortie en (i,j)

	-1	0	1
-1	0	0	0
0	0	0	1
1	0	0	0

n

Symétrie
centrale

	-1	0	1
-1	0	0	0
0	1	0	0
1	0	0	0

n

Noyau: $h_{n,m}$

$h_{-n,-m}$

	j-1	j	j+1
i-1	?	3	4
i	?	9	6
i+1	?	7	8

Filtrage par corrélation

- Convolution pas toujours intuitive:
 - Dans l'exemple précédent, on se serait attendu à garder la valeur 5 (de droite)
- Filtrage par corrélation:
 - On considère le noyau: $h_c(t)=h(-t)$

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(u)h(t - u)du = \int_{-\infty}^{+\infty} x(u)h^c(u - t)du = \int_{-\infty}^{+\infty} x(v + t)h^c(v)dv$$

$$\Rightarrow y_i = \sum_{n=-N}^N x_{i+n}h_n^c \Rightarrow y_{i,j} = \sum_{n=-N}^N \sum_{m=-M}^M x_{i+n,j+m}h_{n,m}^c$$

- Évite l'étape de symétrie
- Souvent la même chose pour les noyaux symétriques
- Les deux sont possibles sous Matlab (voir TP)

Exemple 1: filtre moyennneur uniforme

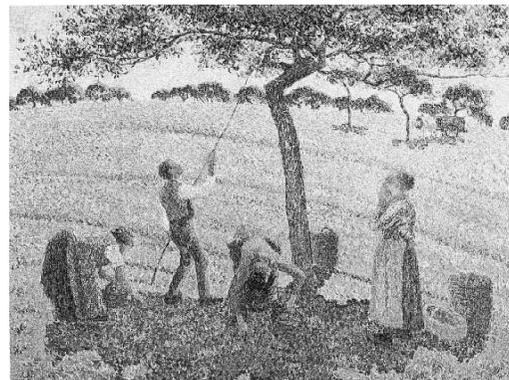
- Noyau
$$h_{n,m} = \frac{1}{(2N+1)(2M+1)}$$
- En pratique: $N=M=1, 2$ ou 3
- Utilisations:

réduction d'un bruit blanc
(stationnaire à moyenne nulle)

Lissage



Filtre 3x3



Filtre 5x5

Exemple 2: filtre moyeneur

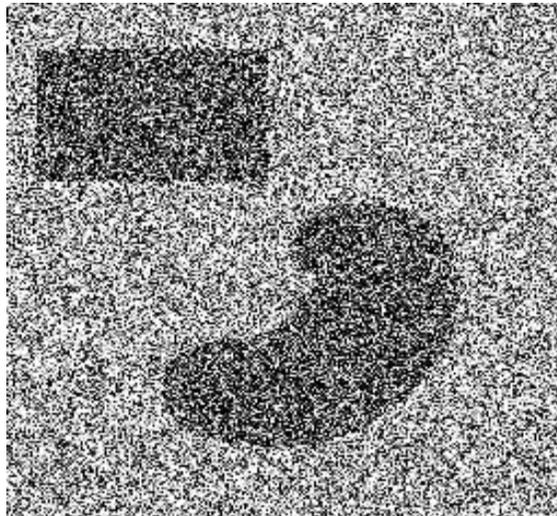
- Noyau

$$\frac{1}{16} \times$$

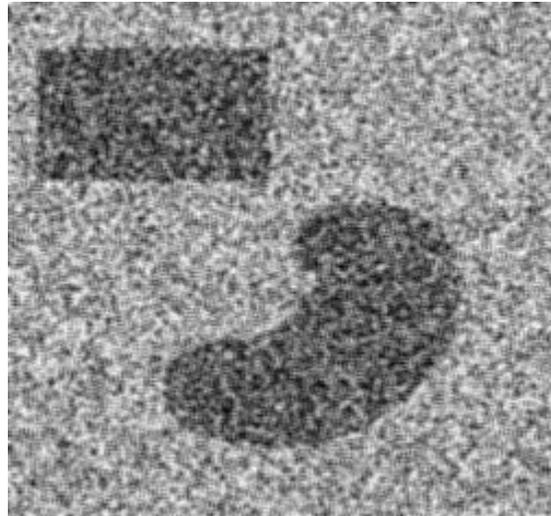
1	2	1
2	4	2
1	2	1

- Comparaison avec le précédent

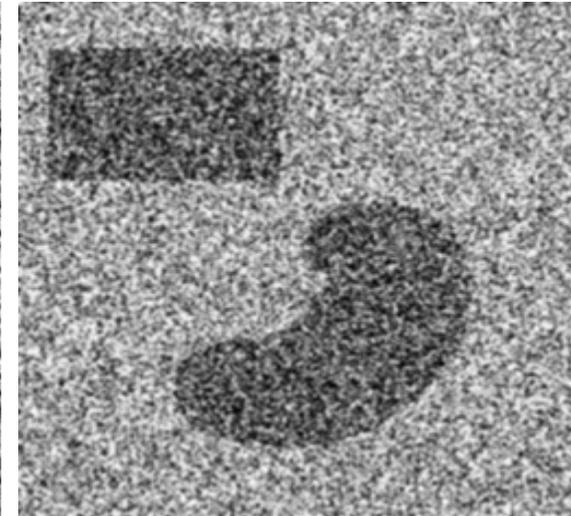
Image originale



Filtre uniforme 3x3



Filtre moyeneur

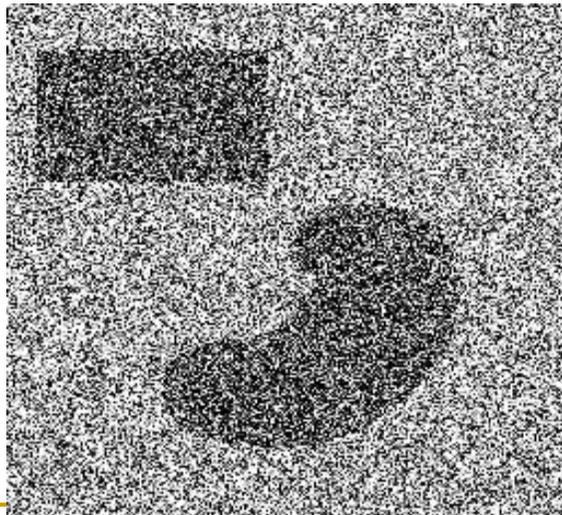


Moins de flou mais plus de bruit

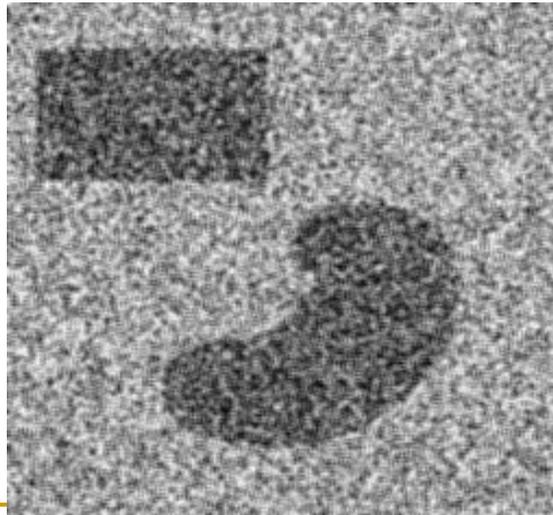
Exemple 3: filtre gaussien

- Fonction à deux variables: $G_{\sigma}(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(\frac{-x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right)$
- Numérisation: $h_{n,m} = \frac{1}{Z} G_{\sigma}(n, m)$
- Z est une constante de normalisation telle que : $\sum_{n,m} h_{n,m} = 1$
- Exemple:

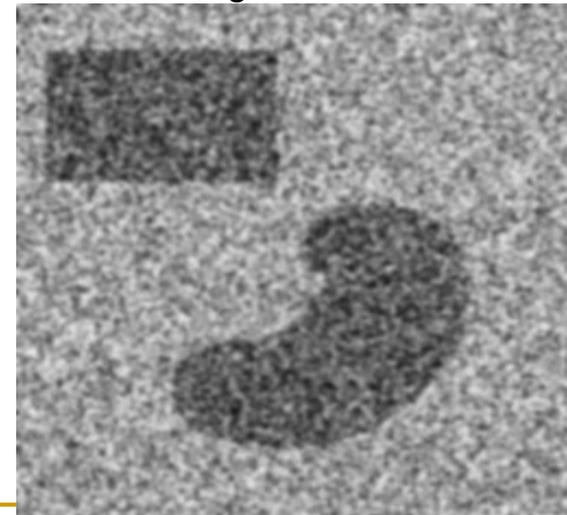
Image originale



Filtre uniforme 3x3



Filtre gaussien $\sigma=1$



Filtre séparable

- Un filtre est séparable quand il peut se décomposer en un filtre horizontal (1D suivant les lignes) et un filtre vertical (1D suivant les colonnes)
- On peut dans ce cas accélérer les calculs car on remplace une convolution 2D par deux convolutions 1D mais avec des filtres plus petits (2x3 éléments au lieu de 9 pour un filtre 3x3)
- C'est le cas si le noyau s'exprime comme la convolution de deux fonctions : une selon x et une selon y
- C'est le cas des 3 filtres vus précédemment

- Filtre uniforme $h(x, y) = \frac{1}{Z} \Pi_T(x) * \Pi_T(y)$

- Filtre moyennneur $h(x, y) = \frac{1}{Z} \Delta_T(x) * \Delta_T(y)$ avec $\Delta_T(t) = 1 - 2 \frac{|t|}{T}$

- Filtre gaussien $h(x, y) = \frac{1}{Z} G_\sigma(x) * G_\sigma(y)$ avec $G_\sigma(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-t^2}{2\sigma^2}\right)$

Bruit

- Le bruit est un signal aléatoire qui vient perturber le signal original
- Le bruit est toujours de même nature que le signal (ex: bruit acoustique sur un signal acoustique...)
- Deux grandes classes de bruit selon leur mode de perturbation du signal
 - Bruit additif: $S_b = S + B$ (ex: bruit en rayons X, bruit « classique »)
 - Bruit multiplicatif: $S_b = SB$ (ex: speckle en échographie, imagerie sonar)
- Un bruit est décrit de manière statistique
 - Loi de probabilité
 - Bruit gaussien (loi de Gauss)
 - Bruit poissonnien (loi de Poisson: la variance dépend de la valeur du signal)
 - Bruit impulsif (poivre et sel: $p_p, p_s, 1-p_p-p_s$)
 - Moments
 - D'ordre 1 (moyenne) $E[B(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} b p_b(b; t) db$
 - D'ordre 2 (autocorrélation) $E[B(t)B^*(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} b^2 p_b(b; t) db$
 - Variance $Var(B(t)) = E[|B(t) - E[B(t)]|^2]$
 - Densité spectrale de puissance=TF de l'autocorrélation

Filtrage non linéaire du bruit

- Filtre d'ordre
 - On considère un voisinage du pixel
 - On ordonne de manière croissante les valeurs observées sur ce voisinage
 - On prend la valeur de rang j dans ce vecteur ordonné
- Exemple courant:
 - filtre médian (rang $(2N+1)(2M+1)/2$)
 - Très bon choix pour le bruit impulsif (robustesse aux valeurs aberrantes)

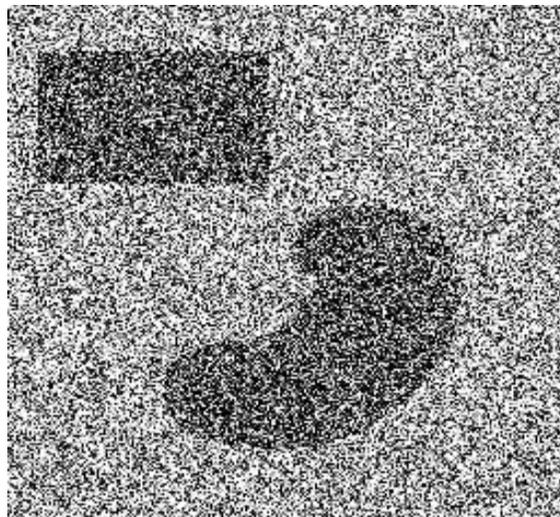
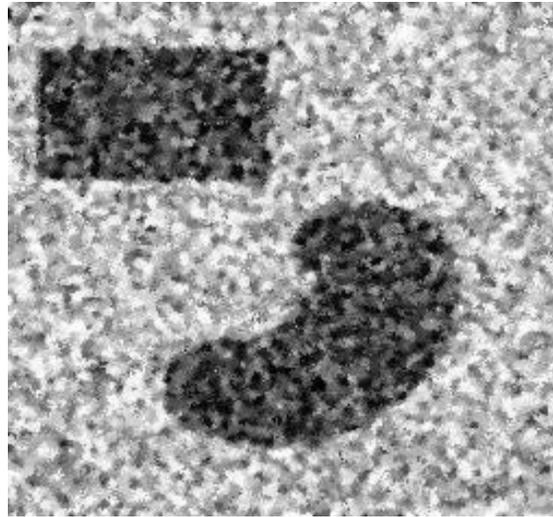
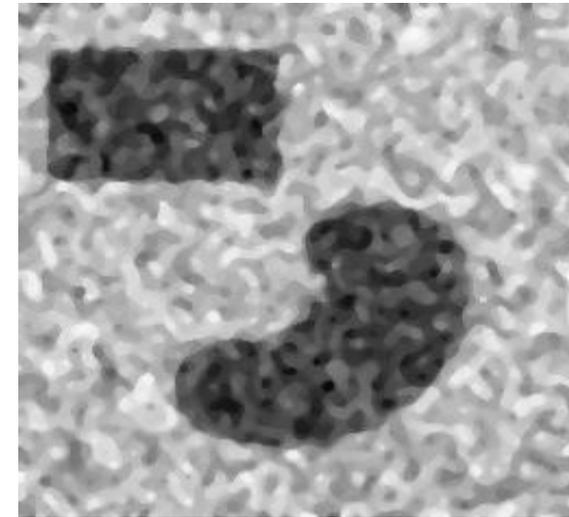


Image originale



Filtre médian 5x5



Filtre médian 5x5 itéré 4 fois

En résumé

- Un filtre travaille localement sur une fenêtre d'analyse
- L'utilisation d'un filtre doit être bien réfléchie et validée : ne perd-on pas des informations essentielles pour la suite de l'analyse ?
- Prendre le temps de bien modéliser le bruit peut permettre un meilleur filtrage
- Attention aux effets de certains filtres (ex: déplacement des contours, apparition de faux contours) : savoir les maîtriser, les minimiser et/ou les prendre en compte dans les traitements consécutifs
- Les filtres sont depuis longtemps et pour un certain temps encore un domaine très actif de recherche. Cf cours sur l'extraction d'indices (estimation du gradient, filtrage anisotrope...).