

UE 832

Introduction à l'imagerie

Pauline Lefebvre

Pauline.lefebvre@univ-lorraine.fr

Janvier 2026

Organisation et objectifs du cours

Objectifs de l'enseignement

Objectif / Organisation : Connaître le fonctionnement et la physique associée aux différentes modalités **d'imagerie médicale**

- Echographie (2 cours) : Pauline Lefebvre
- IRM (4 cours + 1 TD) : Pauline Lefebvre
- Médecine nucléaire (1 cours) : Laëtitia Imbert
- Radiographie/Scanner (1 cours) : Timothée Zaragori
- Traitement d'images (1 cours, 4 TP) : Emilien Micard, Antoine Kneib, Rémi Hattat

Et en plus ...

- 1 TP visite d'installations (IRM/)Médecine nucléaire + démo IRM pédagogique
- Oraux : cours inversés IRM

Organisation des enseignements

10 CM + 1 TD + 3 TP + 1 oral + 1 CC

- 1 CM (13/01) : **Introduction à l'imagerie** (P. Lefebvre)
- 3 CM + 1 TD (19/01 – 23/01 – 26/01 – 19/02) : **IRM** (P. Lefebvre)
- 2 CM (02/03 – 13/03) : **Echographie** (P. Lefebvre)
- 1 CM (?): **Médecine nucléaire** (L. Imbert)
- 1 CM (13/03) : **Physique des rayons X** (T. Zaragori)
- 1 CM (02/03) : **Traitement d'images** (E. Micard)
- + 4 TP associés en mars : **Traitement d'images en Python** (R. Hattat et A. Kneib)
- 1 TP **visites/manip électromagnétisme** (?) : IRM + Nancyclotep (M. Doyen, PA Vuissoz) et en parallèle démo d'un IRM pédagogique (P. Lefebvre)
- 1 oral - **cours inversés évalués** (23/03) : P. Lefebvre et J. Felblinger
- 1 exam (30/03)

Evaluation des enseignements

3 notes

- 1 note sur les 3 TP de traitement d'images (coeff 1)
- 1 note sur les oraux inversés (coeff 1)
- 1 note d'examen (coeff 2)

Introduction à l'imagerie

Pourquoi de l'imagerie ?

Histoire

- Découverte des rayons X, Roentgen 1895 → Première imagerie = radiographie
- Depuis, de nouveaux types d'imagerie ont vu le jour
 - Ultrasons (1950)
 - Scanner X (1975)
 - IRM (1980)
 - TEP (1985)
 - TEMP (1955)

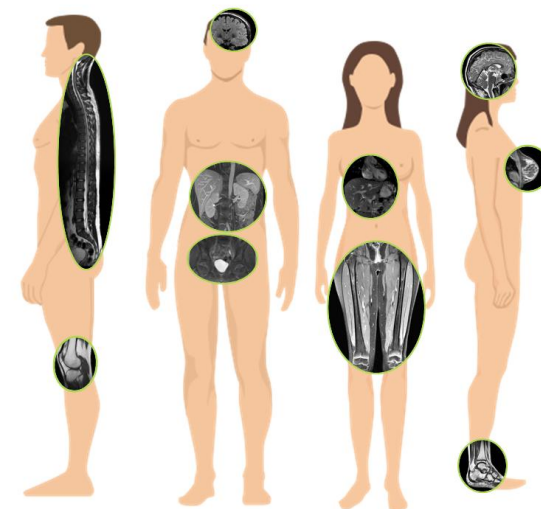


Encore aujourd'hui, des activités de recherche très nombreuses

Complément à l'examen médicale

- Biologie (sang, urine, ...)
- Imagerie médicale
- Biopsie/chirurgie (analyse des tissus/histologie)

→ Critères idéaux en imagerie ?



Introduction à l'imagerie

Acquisition en imagerie médicale

Image analogique vs image numérique

Images analogiques

= Ensemble « infini » de valeurs continues

Photo argentique

Radiographie

Peinture

Diapositive



Images numériques

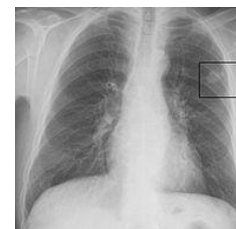
= Ensemble fini de valeurs discrètes

Photo numérique

Radiographie numérique

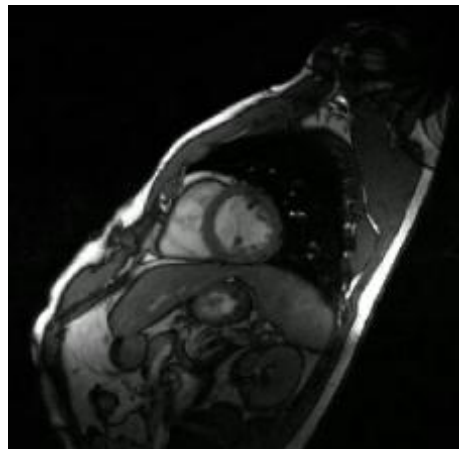
Toutes les images sur votre ordinateur

Diapositive

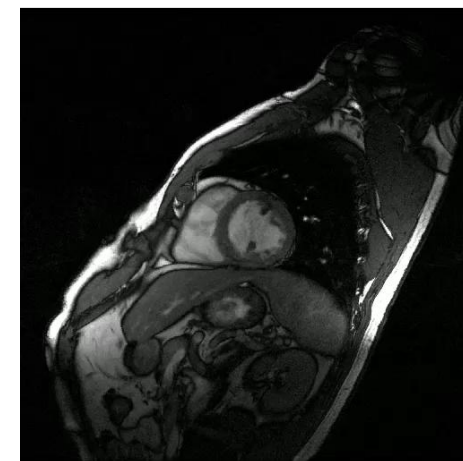


2D, et plus encore ...

2D (noir et blanc)



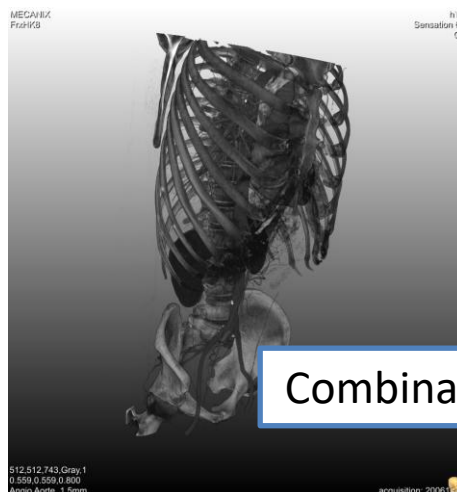
2D + temps



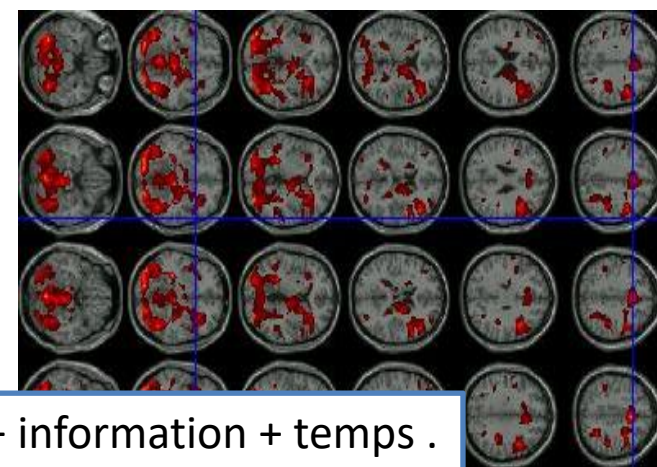
IRM cardiaque

3D

= empilement d'images 2D



3D + information en couleur

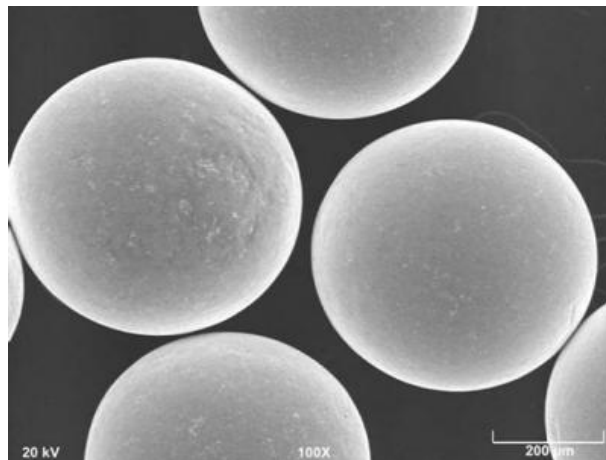


Combinaison possible 3D+t, 3D + information + temps .

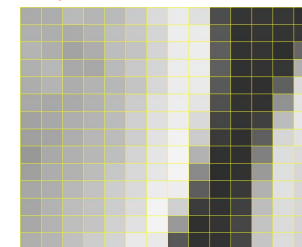
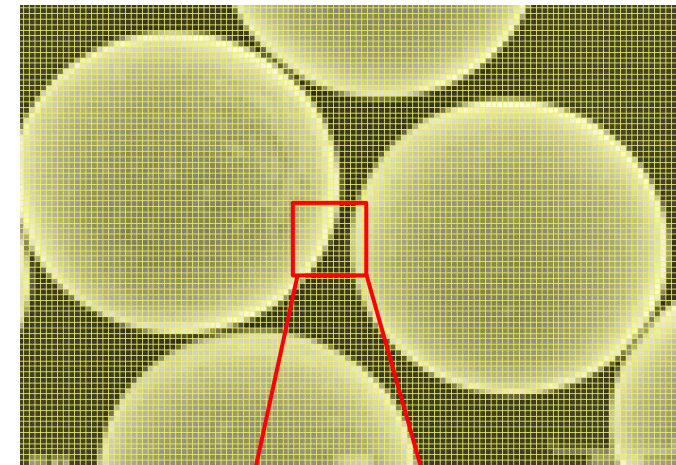
IRM fonctionnelle cérébrale

Pixel/Voxel : échantillonnage

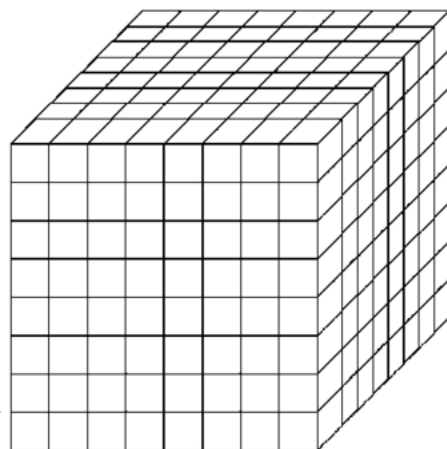
Discrétisation spatiale (en X et Y, évent. Z)
Délimitation de l'image en régions : les pixels ou voxels



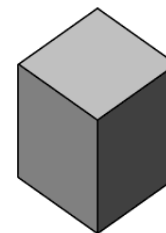
Echantillonnage
2D



Un carré = Pixel
(2D)
(Picture element)



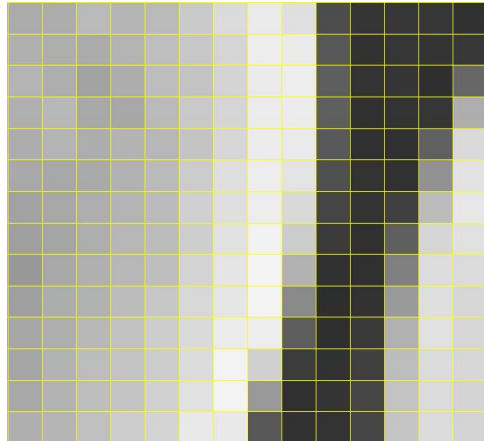
Echantillonnage
3D



Un cube =
Voxel (3D)

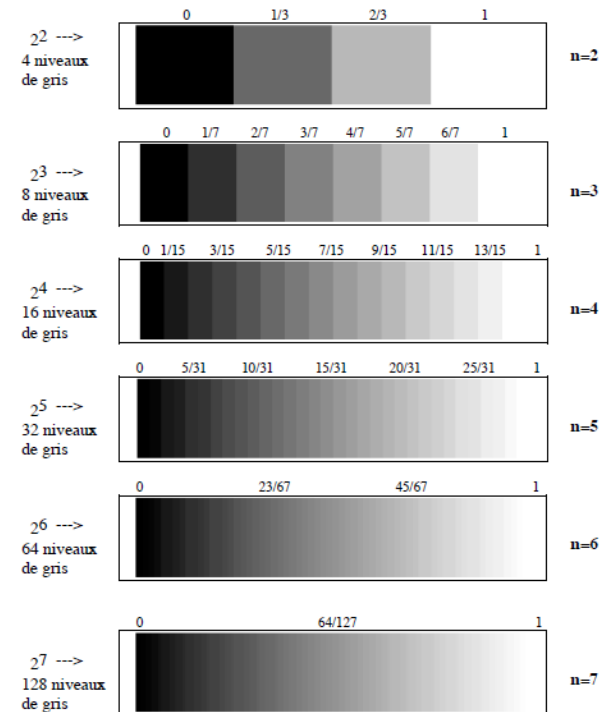
Quantification

Discrétisation d'amplitude



Quantification

173	175	188	183	188	204	222	237	226	78	54	56	56	49
178	176	175	183	193	202	215	239	238	89	51	55	53	56
182	176	165	175	191	197	214	237	240	95	52	55	48	105
178	186	170	170	189	203	215	239	239	96	51	52	55	176
175	182	175	181	185	198	217	238	237	90	49	49	97	220
171	170	172	180	189	206	225	240	230	81	51	51	148	229
164	170	176	181	189	210	225	240	219	71	52	65	190	234
161	167	176	185	190	209	229	244	206	60	48	96	216	227
153	172	178	184	192	214	232	247	180	50	49	129	224	222
161	174	180	190	201	219	232	247	139	47	51	156	226	217
169	176	186	195	207	220	238	239	95	48	58	179	228	217
168	181	191	198	207	222	245	210	61	51	65	191	223	217
170	181	192	198	211	227	246	155	49	53	70	197	221	215
177	183	194	207	215	236	235	89	51	52	71	199	222	214



Combien de niveaux de gris utiliser ?
ex : 1 octets (8 bits) = 256 valeurs possibles

Echantillonnage/Quantification

Echantillonnage



512x512



256x256



128x128



64x64



32x32

Quantification



8 bits



4 bits



3 bits



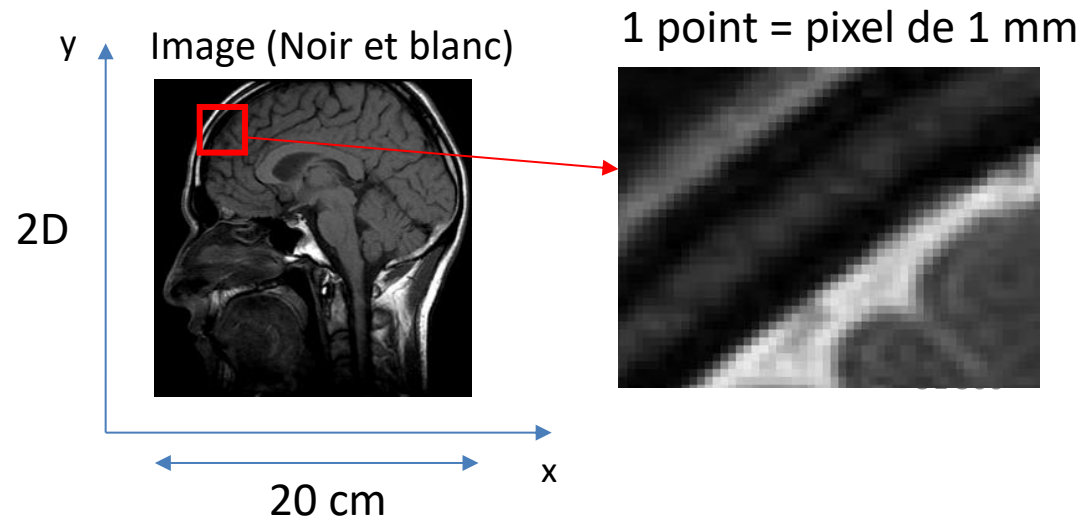
2 bits



1 bit

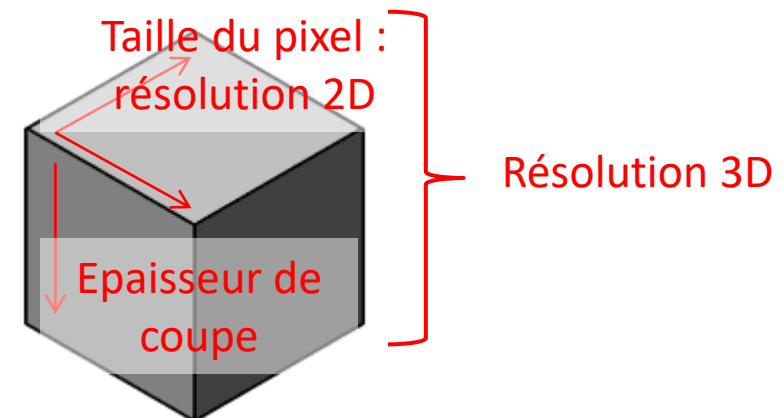
Définition et résolution spatiale de l'image

- **Définition de l'image** = nombre de pixels * nombre de pixels
- **Résolution de l'image** = pixels / unité de longueur



Résolution spatiale 2D ou 3D

- * Dépend de la physique d'acquisition et la durée d'acquisition
- * Résolution 3D = Épaisseur de coupe + plan 2D
- * Résolution isotropique si identique dans les 3 dimensions



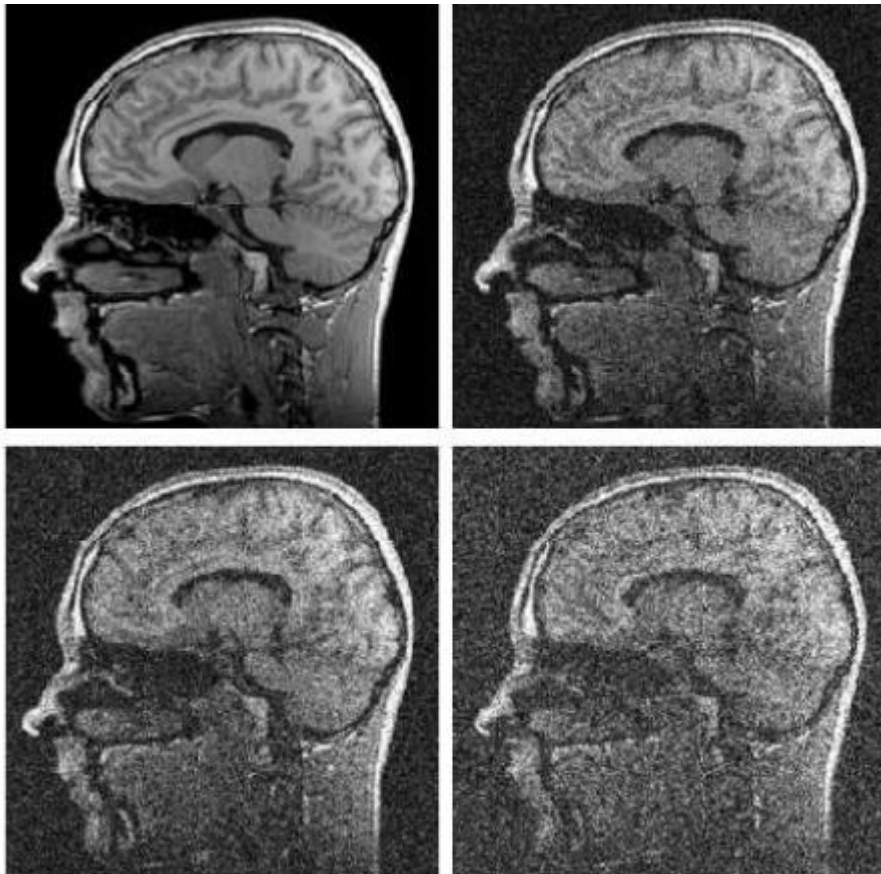
Format DICOM

- Digital Imaging and COmmunications in Medicine
- Standard en imagerie médicale
- Présentation rapide
 - Données brutes : **raw data**
 - Champs spécifiques : **tags**
- Objectif
 - Donner des informations en plus de l'image (les métadonnées)
 - Champs libres : type de modalité, nom du patient, taille du pixel...
 - Mais aussi des champs propriétaires

Notion de qualité d'image

Rapport Signal sur Bruit (RSB)

RSB ++



RSB --



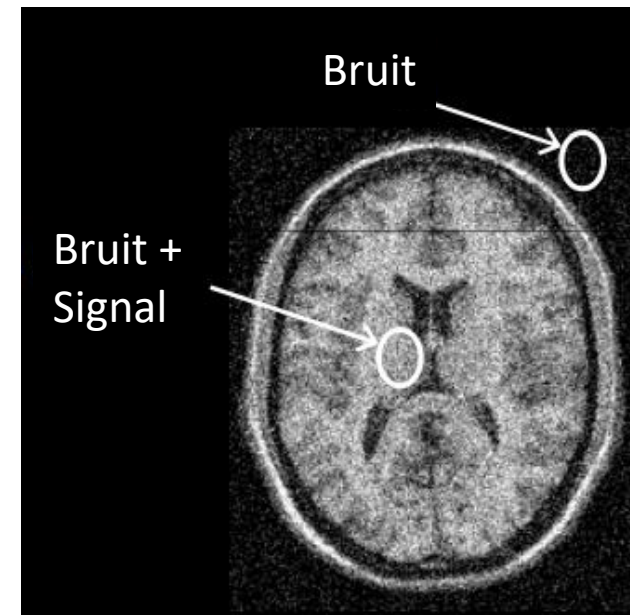
RSB

=

S/B

=

SNR



Notion de qualité d'image

↳ Rapport Signal sur Bruit (RSB)

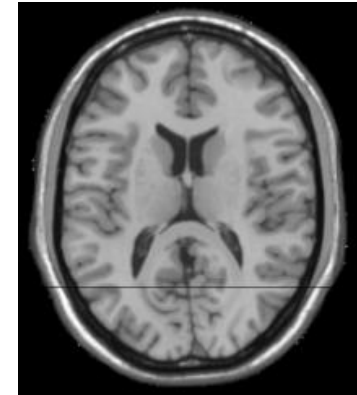


Moyenne → Signal

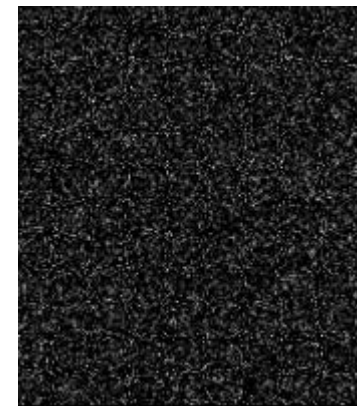
Écart-type → Bruit

RSB =

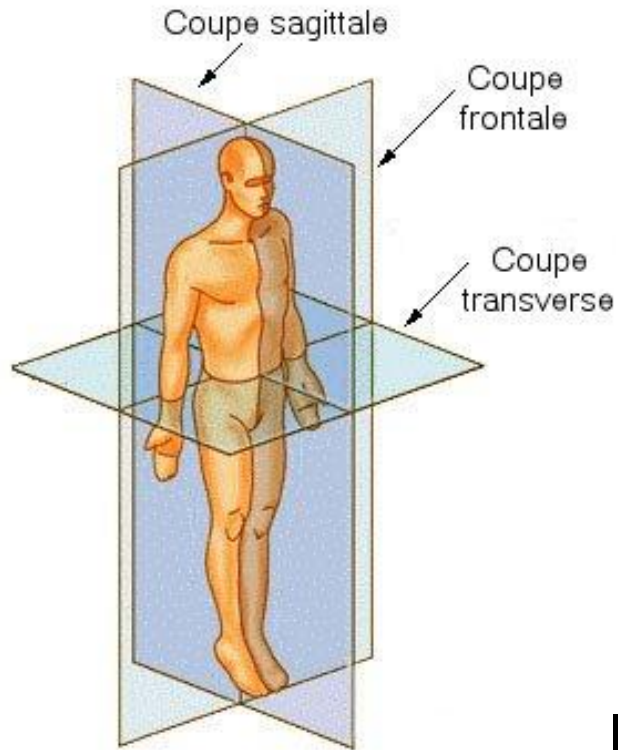
Mean(



Std(



Plans de coupes en imagerie médicale



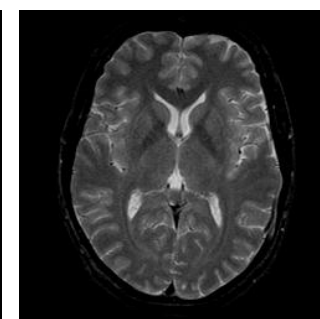
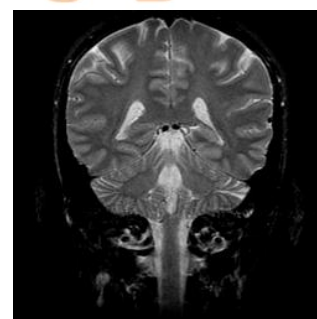
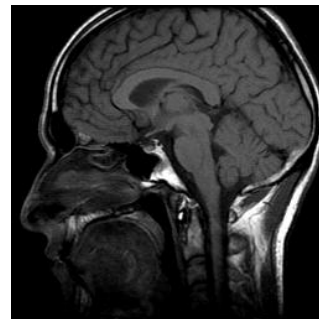
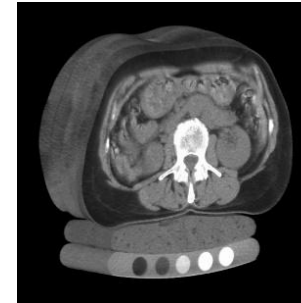
Sagittale



Coronale
(frontale)



Axiale
(transverse)



Sensibilité et Spécificité

		Pathologie	
		Oui (Malade)	Non (Sain)
Détection	Oui Test positif	VP	FP
	Non Test négatif	FN	VN

Vrai Positif : pathologie existante, détectée

Vrai Négatif : pas de pathologie, pas de détection

Faux Positif : détection mais pas de pathologie

Faux Négatif : pathologie non détectée

Sensibilité = $VP / (VP + FN)$

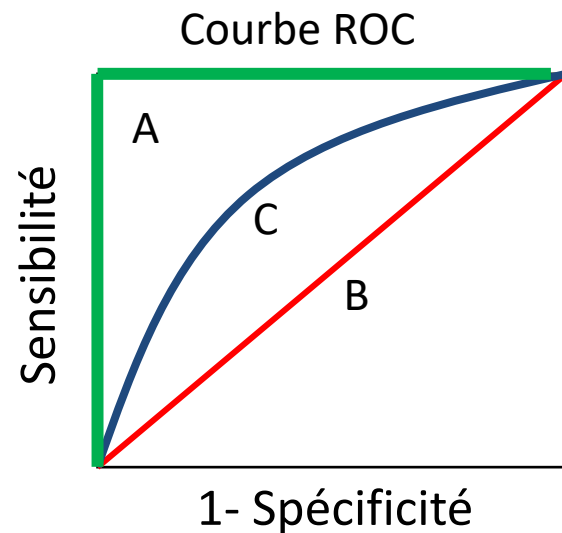
Spécificité = $VN / (VN + FP)$

→ Parmi les malades, quelle proportion est détectée par le test ?

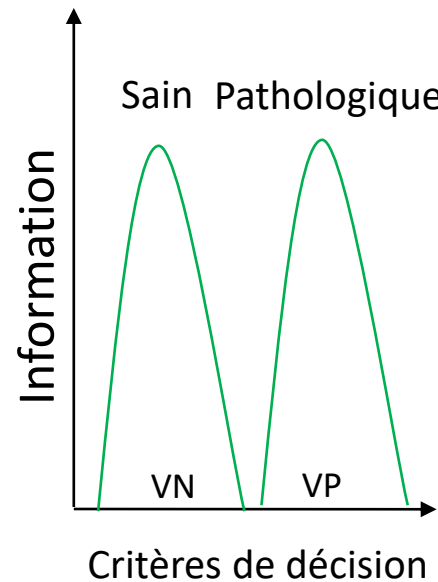
→ Parmi les non-malades, quelle proportion a un test négatif ?

Sensibilité et Spécificité

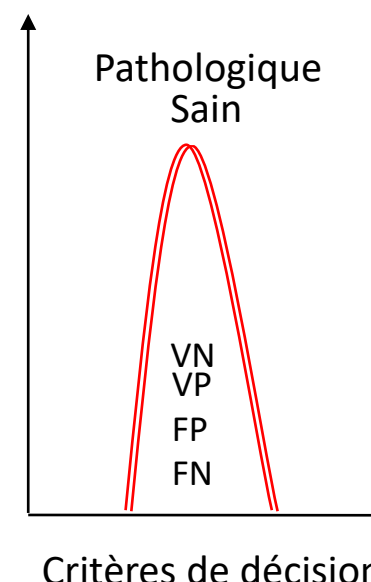
→ La courbe ROC (Receiver Operating Characteristic) représente la sensibilité en fonction de $1 - \text{spécificité}$ pour toutes les valeurs seuils possibles du marqueur/critère de décision étudié.



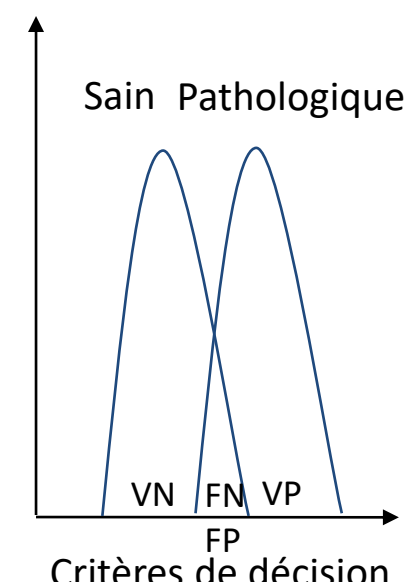
ROC : Receiver Operating Characteristics



Parfait
Pas de FN ni FP



Pas de discrimination
possible



Vrai vie

Sensibilité : détecte bien les malades ? = taux de vrais positifs

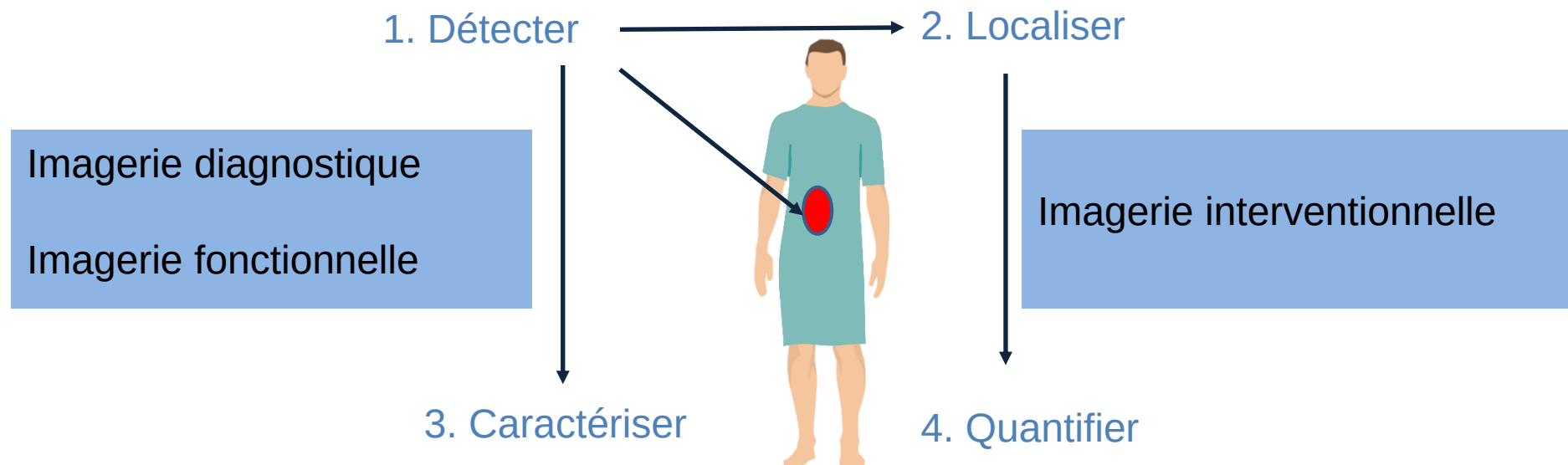
Spécificité : détecte bien les non-malades ? → $1 - \text{spécificité}$ = proportion de faux positifs

Introduction à l'imagerie

Les différents types d'imagerie

Qu'attend-on de l'imagerie médicale ?

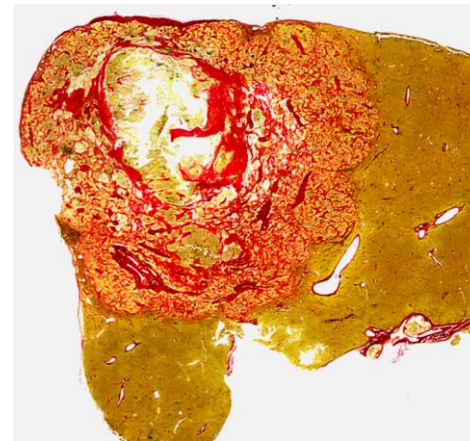
- Anatomie précise : normale / pathologique
- Fonctionnement d'un organe : normal / réduit / sur-actif
- Aide au traitement, à l'opération ...



Imagerie diagnostique

1. Représentation anatomique (morphologique)

- Au niveau macroscopique, organes normaux vs organes pathologiques
- examen in vivo, non invasif (peu invasif, injection de produit de contrastes)



Contraste entre les organes normaux / pathologiques

Imagerie diagnostique

2. Contribution à l'identification anatomo-pathologique des lésions

- Caractérisation lésionnelle (caractérisation tissulaire + aspects anatomiques)
- Localisation, taille des lésions ...

3. Suivi de l'évolution d'une pathologie ou d'un traitement



Résolution spatiale suffisante

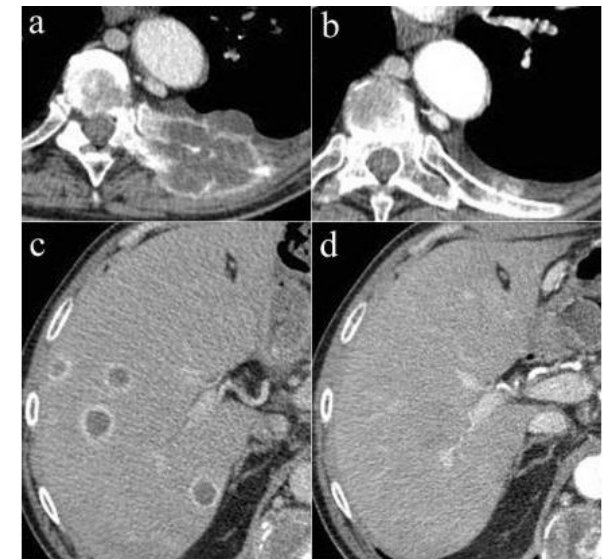


Figure 1. Patient porteur d'un cancer du rein métastatique sous traitement évalué selon les critères internationaux, montrant une très bonne réponse au traitement. Coupes axiales de scanner d'une métastase envahissant l'arc postérieur de la 9ème côte gauche et de multiples métastases hépatiques respectivement avant traitement (a, b) puis après traitement (c, d) avec diminution importante de taille de la lésion costale et disparition complète des lésions hépatiques.

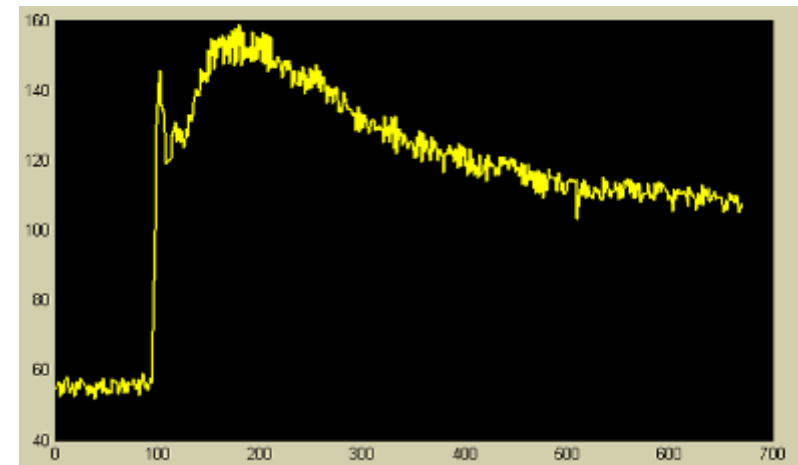
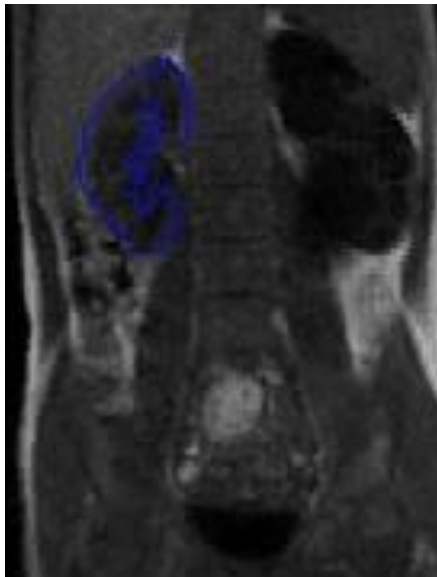
Imagerie fonctionnelle

1. Etude de **processus fonctionnels**

- Caractérisation de la fonction des organes par l'étude de la cinétique de rehaussement après injection de produits de contraste



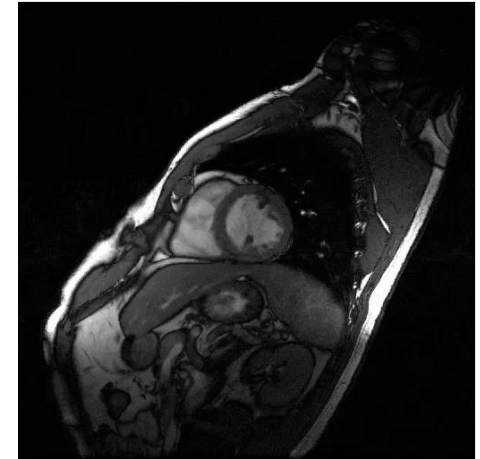
Injection de produit de contraste
Analyse de la prise de contraste



Imagerie fonctionnelle

2. Etude du **fonctionnement dynamique** d'un organe

- Caractérisation de la fonction des organes par une série d'images dynamiques



3. Etude de l'**activité cérébrale**

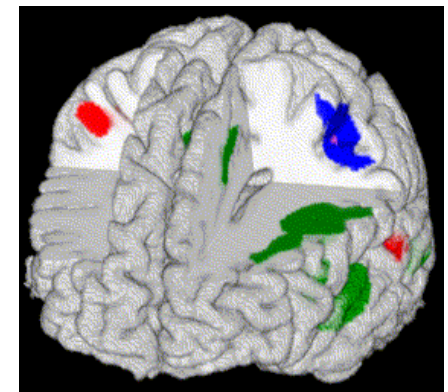
- Changement de contraste des images neuroradiologiques lors d'une activité (activité motrice, mentale, etc...)

→ Cartographie des aires cérébrales (IRM fonctionnelle)

Rouge: Moteur Gauche

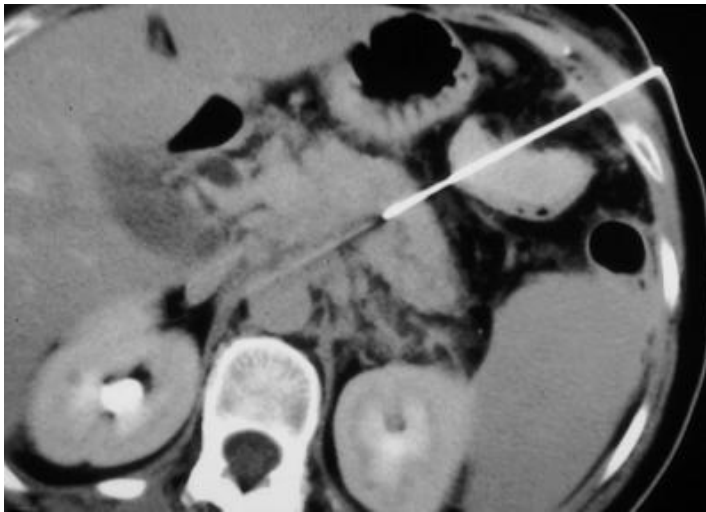
Bleu: Moteur Droit

Vert: Langage

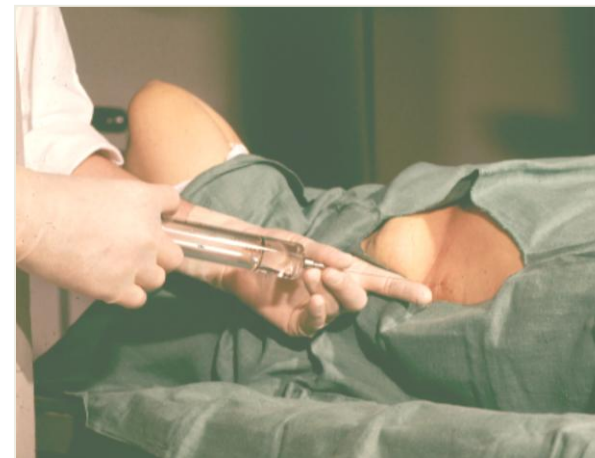
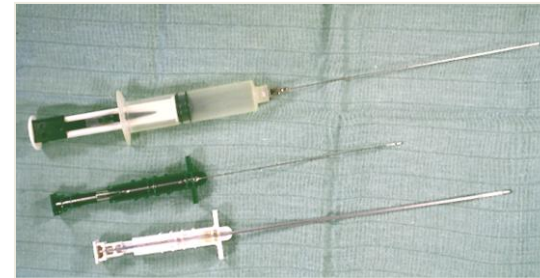


Imagerie interventionnelle

1. Suivi d'un instrument de chirurgie ou un cathéter pour effectuer un acte moins invasif et **guidé par imagerie** (scanner, échographie ...)

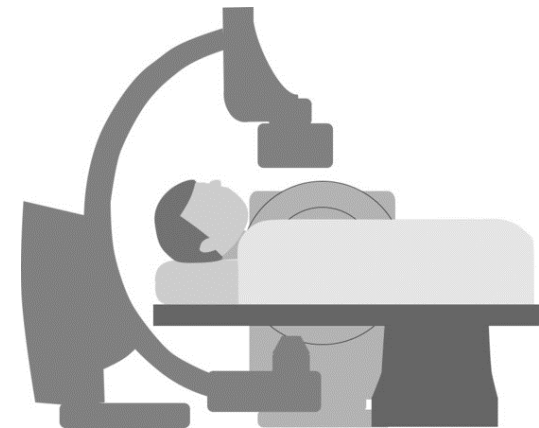


Ponction-biopsie sous scanner



Imagerie interventionnelle

→ Développement de salles hybrides : chirurgie + imagerie

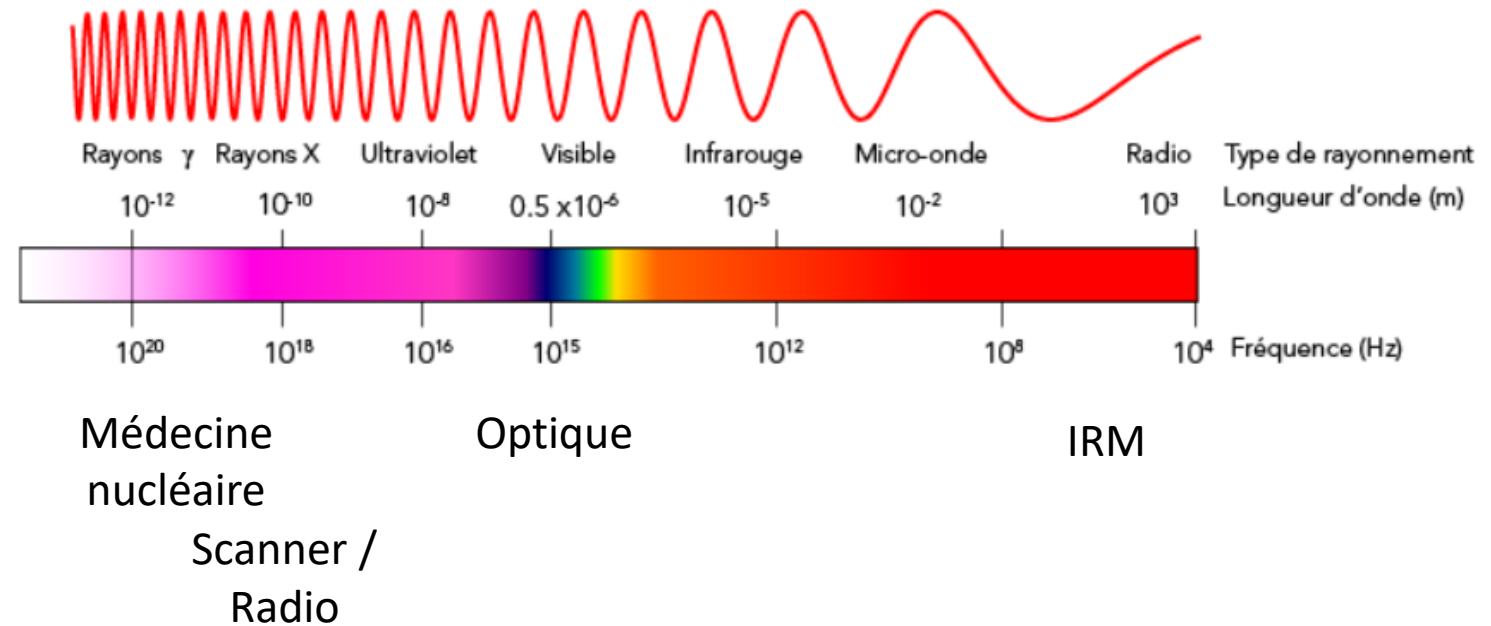


Introduction à l'imagerie

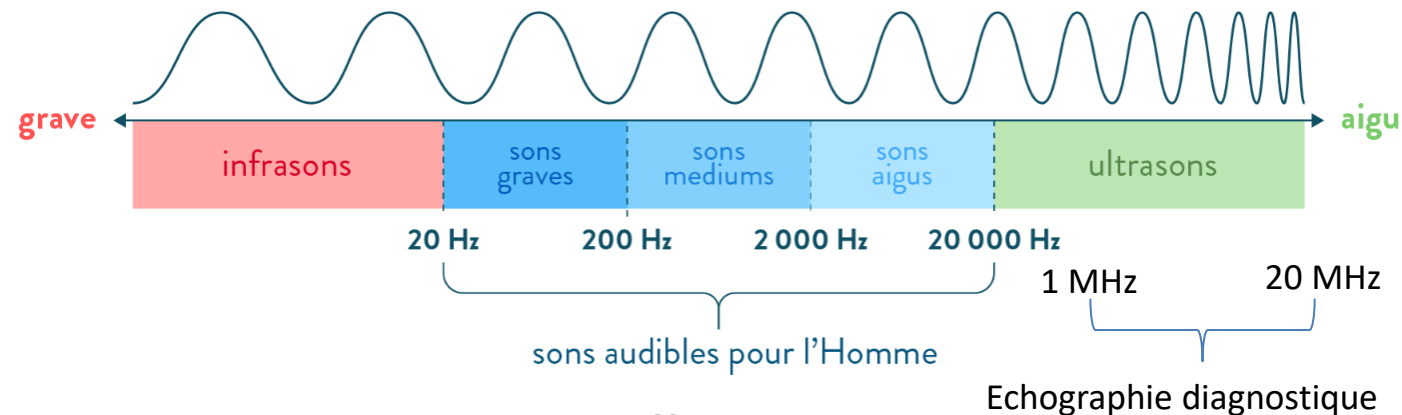
Aperçu des 4 modalités d'imagerie

4 modalités d'imagerie = 4 physiques différentes

Ondes électromagnétiques :

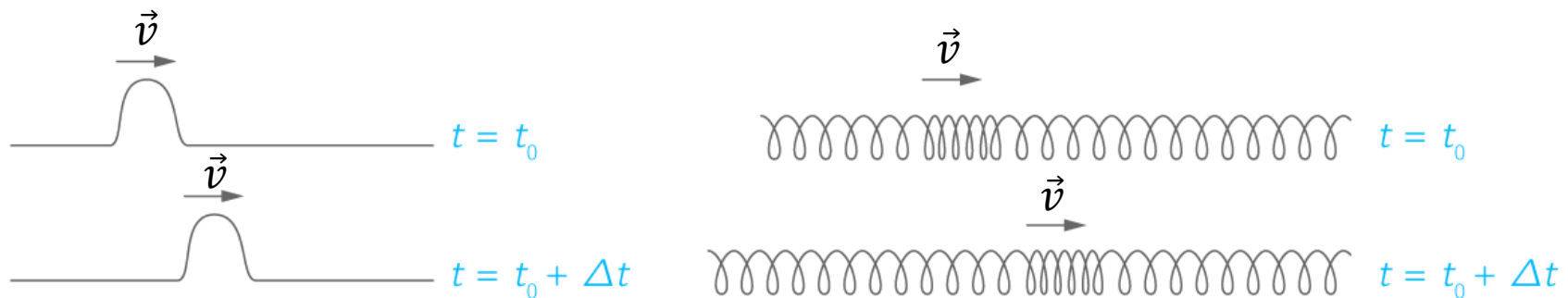


Ondes sonores (mécaniques) :



Ondes mécaniques

➡ Onde **mécanique** = propagation de proche en proche d'une perturbation locale dans un milieu matériel, sans transport de matière mais avec transport d'énergie

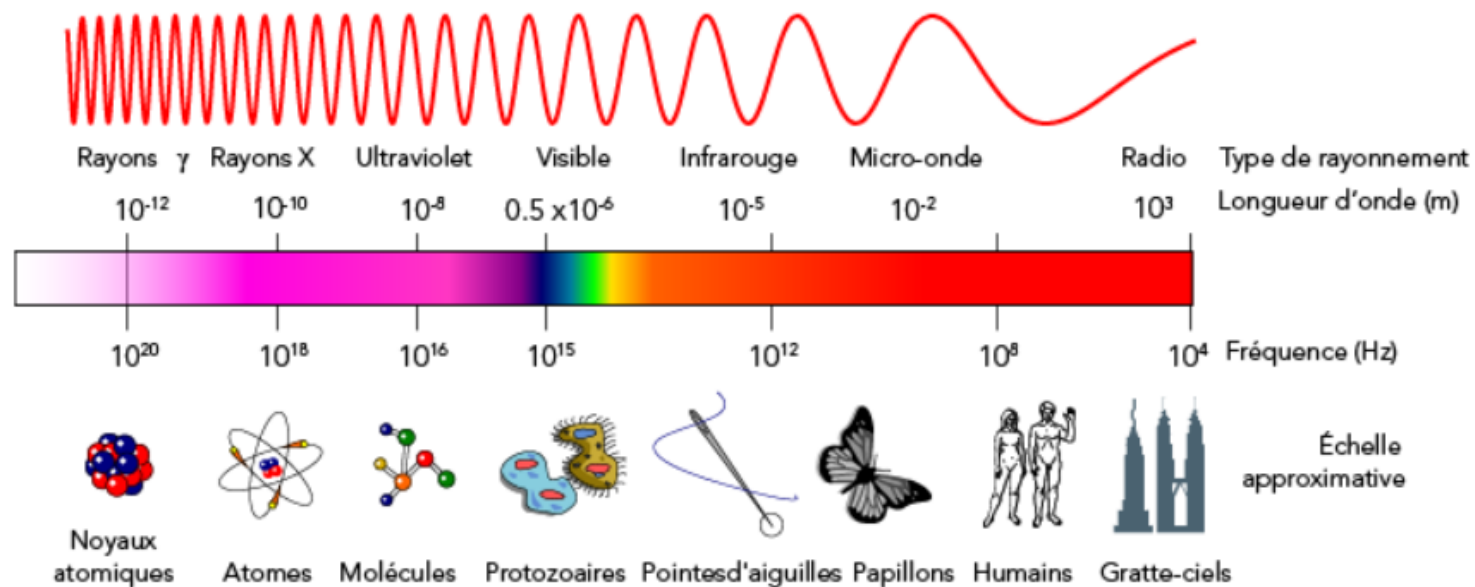


Les différents éléments composant la matière ne sont pas entraînés par l'onde, **ils ne se déplacent pas**.

Ils oscillent avec une vitesse v'

Ondes électromagnétiques

- **Onde électromagnétique** : ne nécessite pas de support matériel pour se propager
- Elles sont classées en fonction de leur **fréquence** (ie le nombre d'oscillations en une seconde) = **spectre électromagnétique**

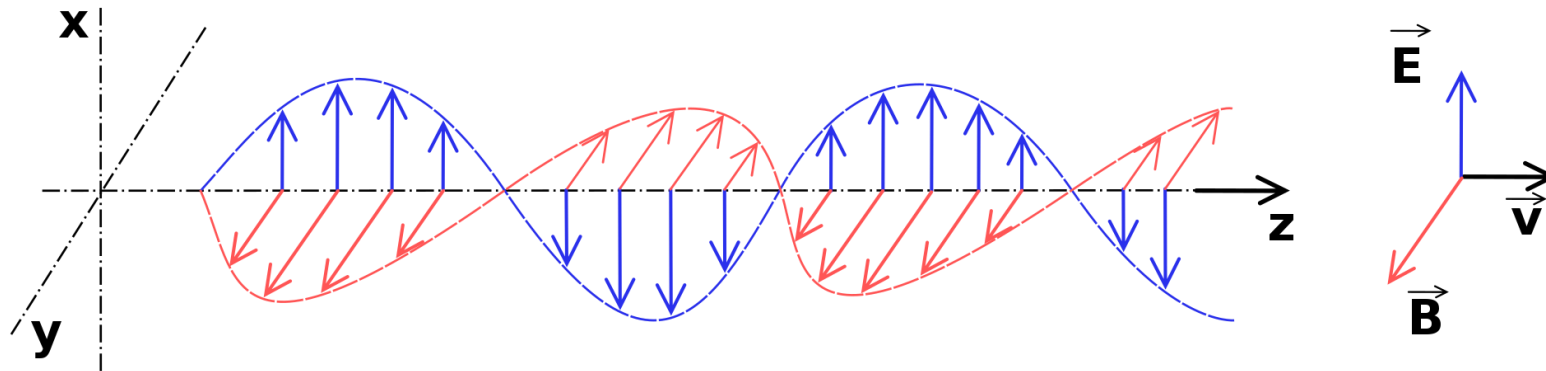


Ondes électromagnétiques

- ↪ Les ondes électromagnétiques peuvent être étudiées selon deux visions différentes : sous la forme **ondulatoire** ou **corpusculaire**

C'est la **dualité onde-corpuscule**

- ↪ Description **ondulatoire** :



→ Oscillation en phase d'un champ électrique $\vec{E}$ et d'un champ magnétique $\vec{B}$, perpendiculaires entre eux et à la direction de propagation

→ Comme toutes les ondes, caractérisées par :

- La longueur d'onde λ
- La fréquence $f = 1/T$

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Description utilisée en optique ondulatoire, mais pas dans les cours donnés dans cette UE

Ondes électromagnétiques – dualité onde-corpuscule

↳ Description **corpusculaire** (= quantique) :

- Les rayonnements électromagnétiques sont identifiés comme un **faisceau de particules**, ce qui va notamment permettre d'expliquer les interactions entre ondes EM et matière (utile pour les rayonnements à haute fréquence)

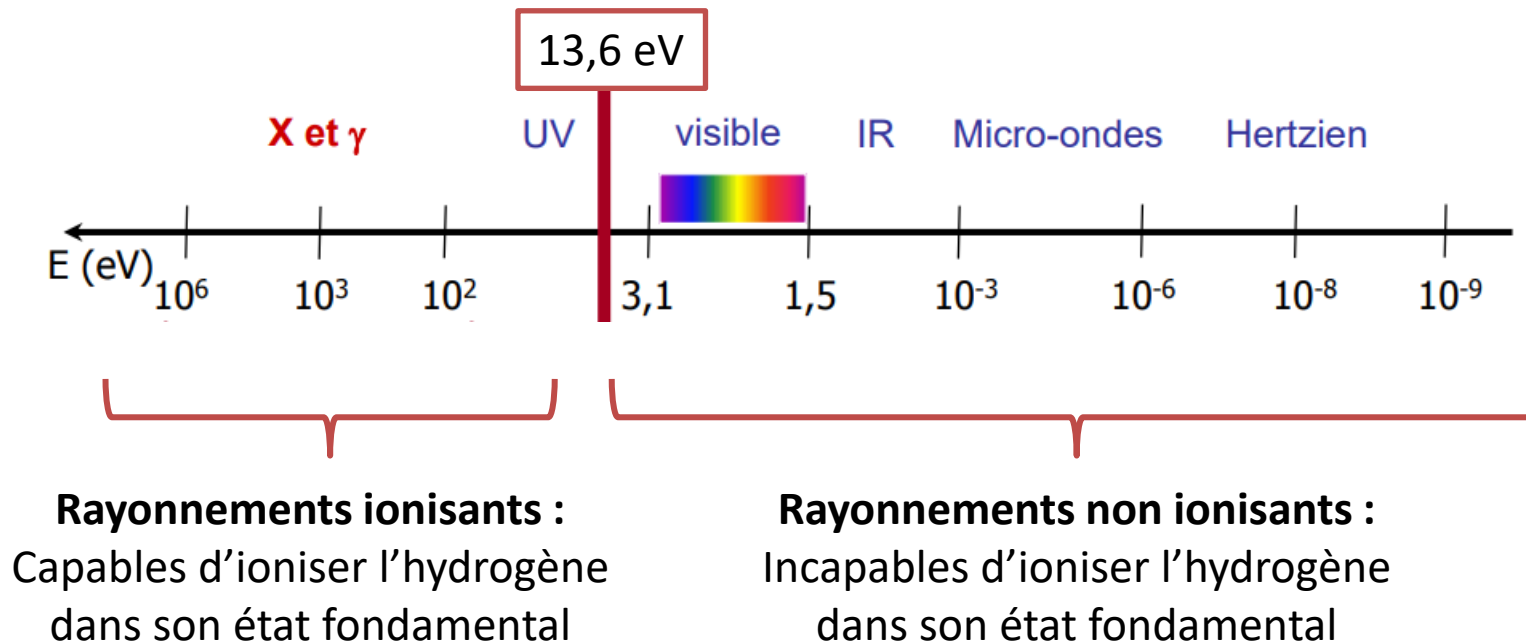
Corpuscules (« grains d'énergie ») appelés **photons**

De masse nulle et sans charge, voyageant dans le vide à la vitesse de la lumière

- Notion de quanta d'énergie : $E = h\nu$
 - h la constante de Planck : $h = 6,62 \times 10^{-34}$ J.s
 - ν la fréquence du rayonnement
 - E en Joules, généralement exprimée ensuite en électron-volt (eV)
 - $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
- La quantité d'énergie est liée à la fréquence

Description utilisée en
médecine nucléaire &
radiographie/scanner

Ondes électromagnétiques – rayonnements ionisants

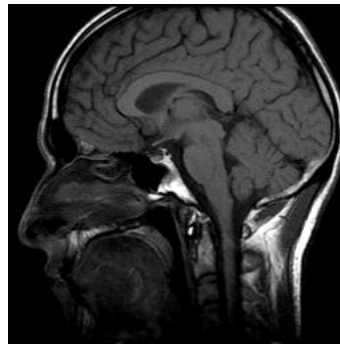


$$E_{\varphi} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \geq 13,6 \text{ eV} \quad \Rightarrow \quad \lambda \leq 91 \text{ nm}$$

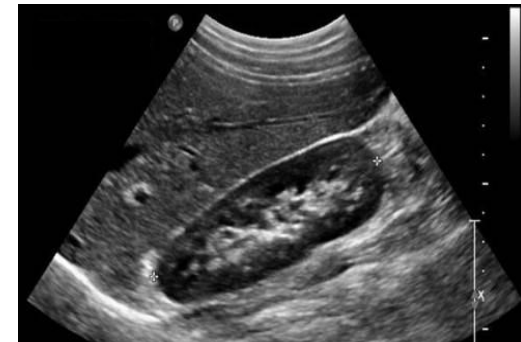
Formation des images



IRM



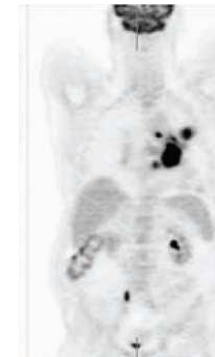
Echographie



Radio/Scanner



?



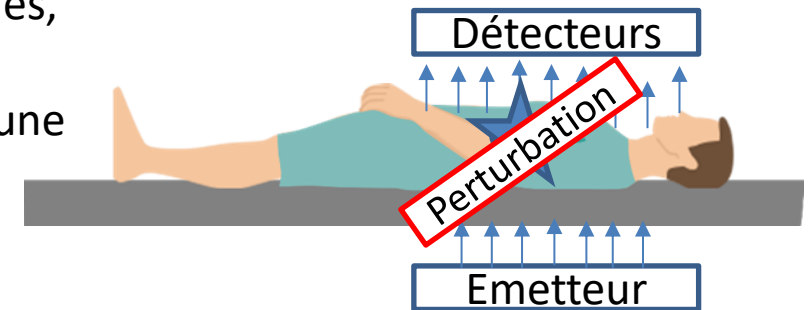
Médecine nucléaire

Phénomènes physiques

↪ Caractéristiques mécaniques, thermiques, magnétiques, électriques, optiques.....

= Les physiques en jeu sont différentes d'une imagerie à une autre

= Réception d'un phénomène physique



Principe général : perturbation (émetteur) / puis détection de la conséquence de la perturbation (décteur)

→ « Perturbation » par un **émetteur d'ondes électromagnétiques**

Détection des informations électromagnétiques : Imagerie par Résonance Magnétique

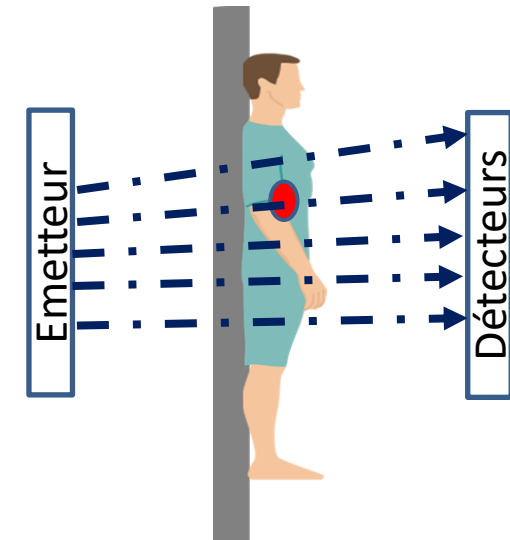
Détection des informations caractéristiques de la densité de la matière : Rayons X

→ « Perturbation » par un **émetteur d'ondes mécaniques (acoustiques)**

Détection des informations mécaniques : échographie ultrasonore

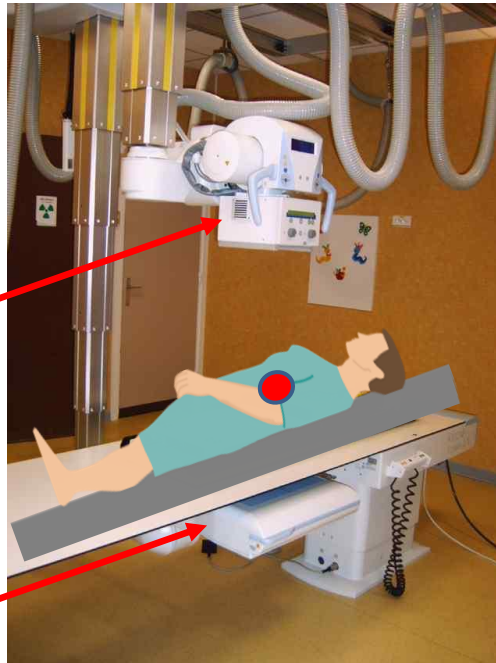
Radiographie-Scanner

- Emission de rayons X par l'émetteur (tube de Coolidge) qui vont traverser les tissus
- Suivant leur densité et numéro atomique, les tissus vont +/- absorber les rayons X
- Le détecteur « compte » les rayons X à l'arrivée



Générateur RX

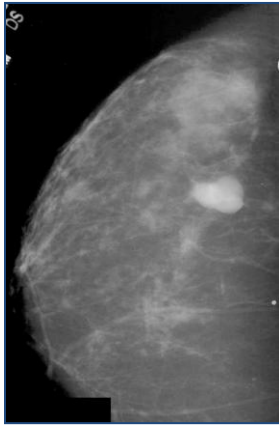
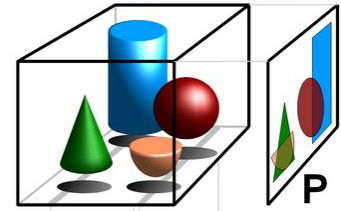
Détecteur RX
Capteur Plan



Radio pulmonaire

Radiographie-Scanner

- **Projection** sur le plan du détecteur de rayons X de **l'ensemble du volume** traversé par les rayons X
- Imagerie ionisante (rayons X)
- Caractérisation tissulaire : **densité** des tissus



Mammographie:
fibroadénome du sein



Calcifications sur l'aorte

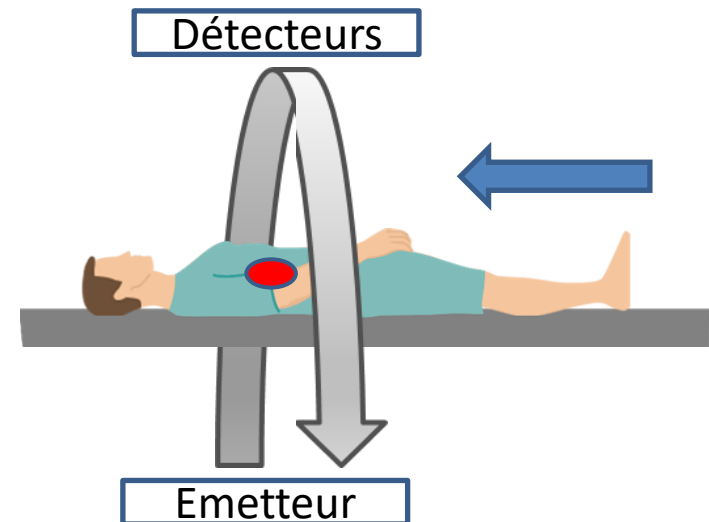
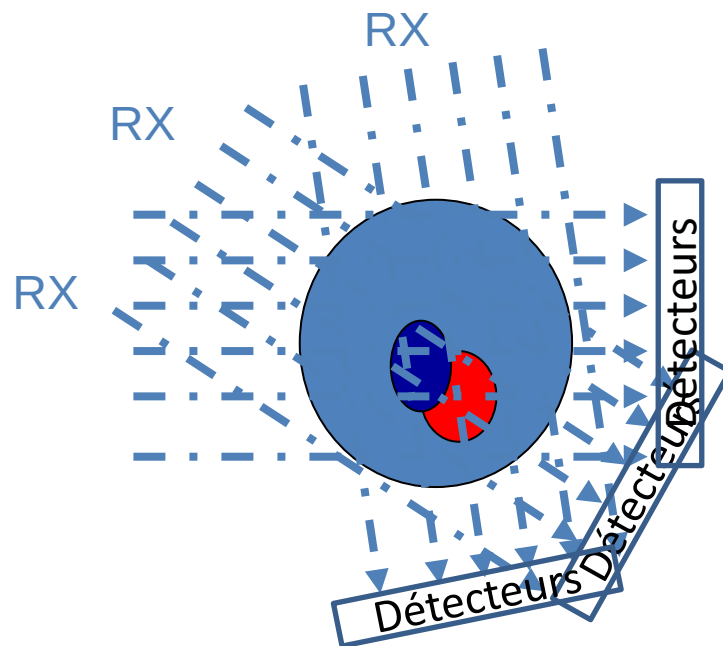


Imagerie pulmonaire

Radiographie-Scanner

- Plusieurs noms : scanner X, tomodensitométrie (TDM), CT-scan
- Images radio à plusieurs angles
- L'émetteur et le détecteur tournent autour du patient

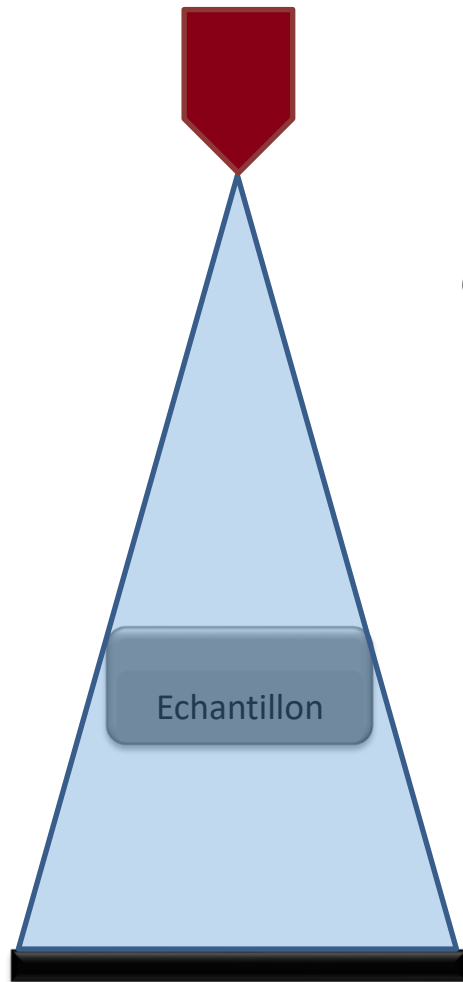
Multiple projections (scanner)



Reconstruction: Calcul de la coupe
Projection des informations de densités

Radiographie-Scanner

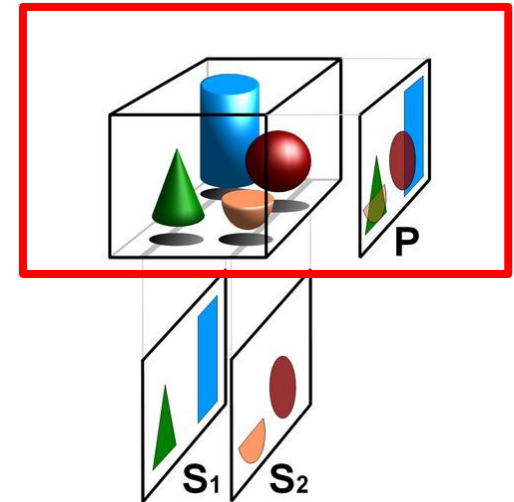
↪ Acquisition d'une série de projections 2D



Moule en aluminium avec circuit de chauffe et défauts matière



Série de projections 2D à différentes positions angulaire (rotation de la pièce sur 360°)



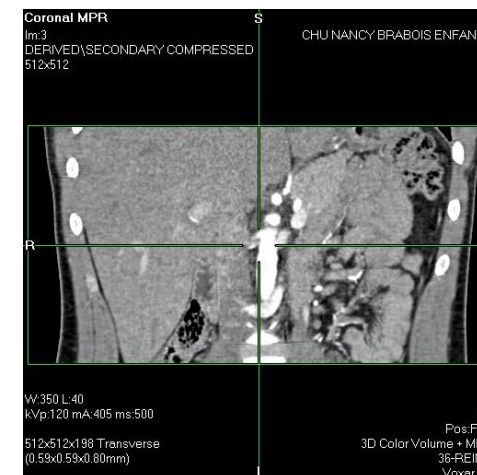
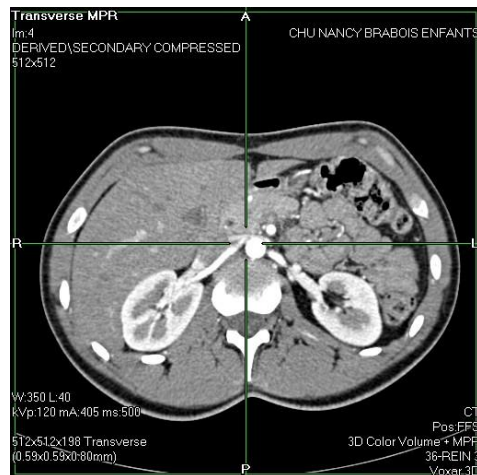
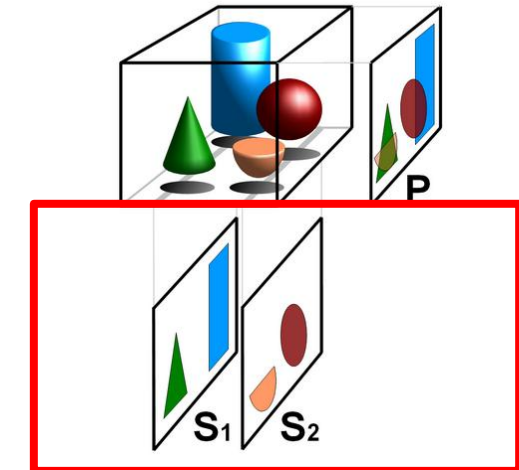
Radiographie-Scanner

[Il filme la rotation d'un scanner démonté...](#)
[Impressionnant - Vidéo Dailymotion](#)



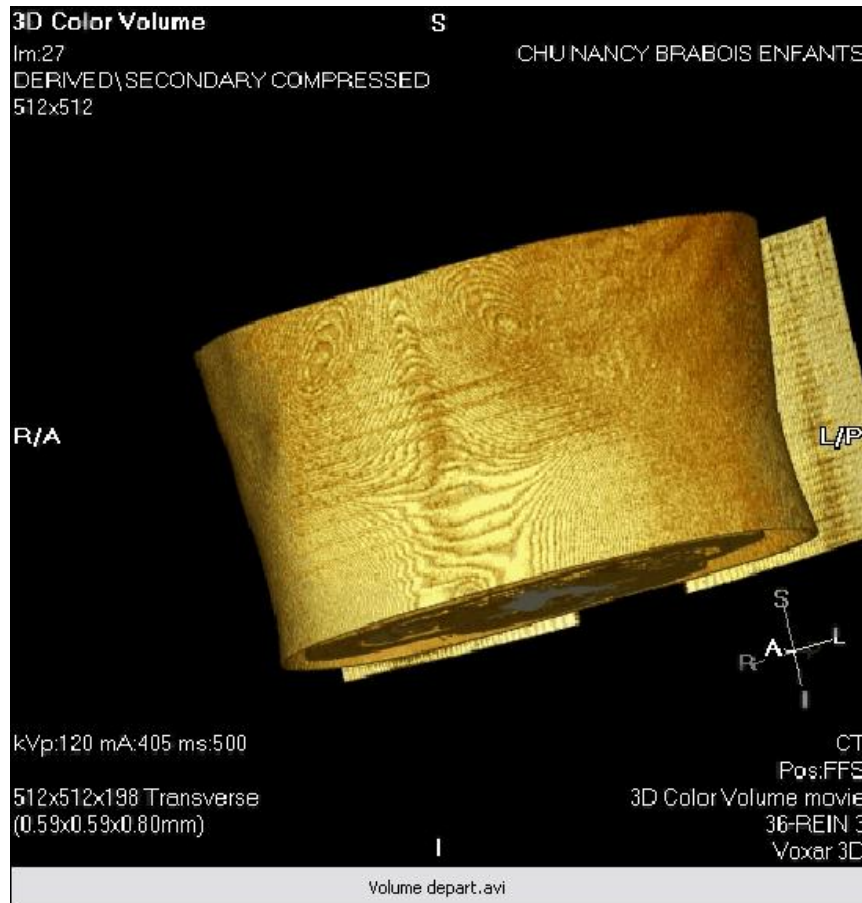
Radiographie-Scanner

- A partir des multiples projections → **reconstruction de coupes**
- Information en 3D sur la **densité** des tissus

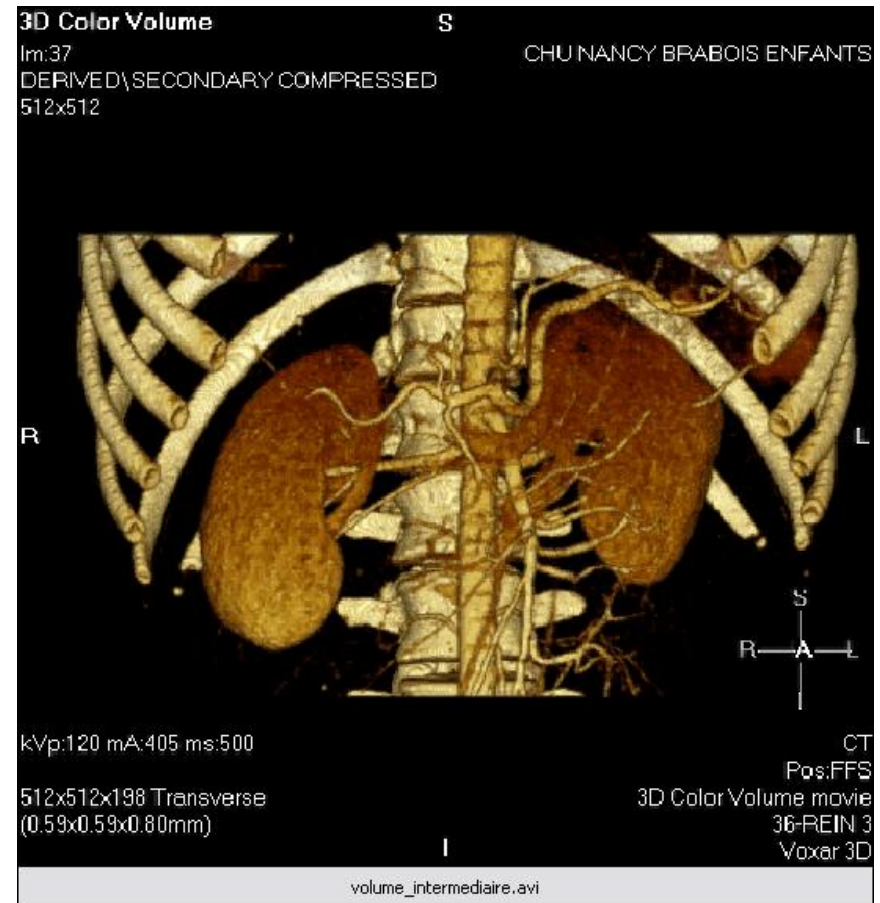


Radiographie-Scanner

Reconstruction anatomique en fonction de la densité des organes



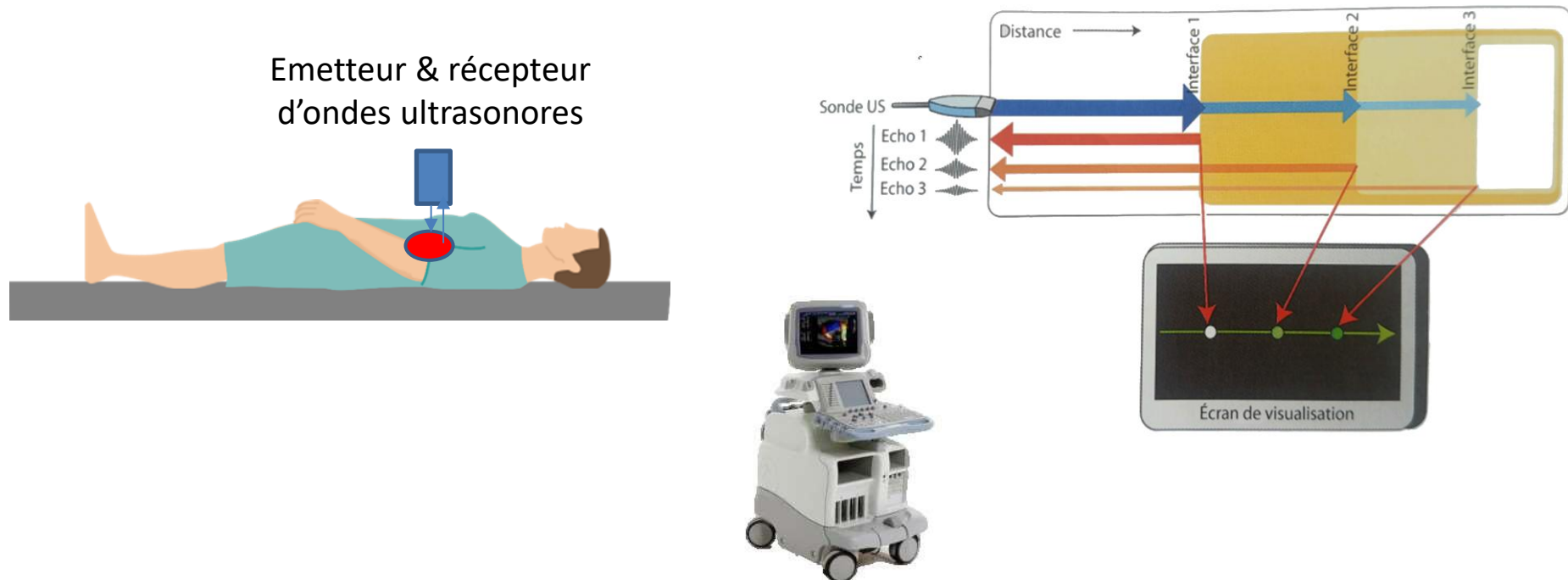
Volume initial



Volume final

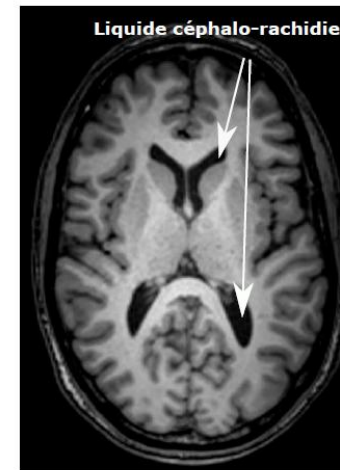
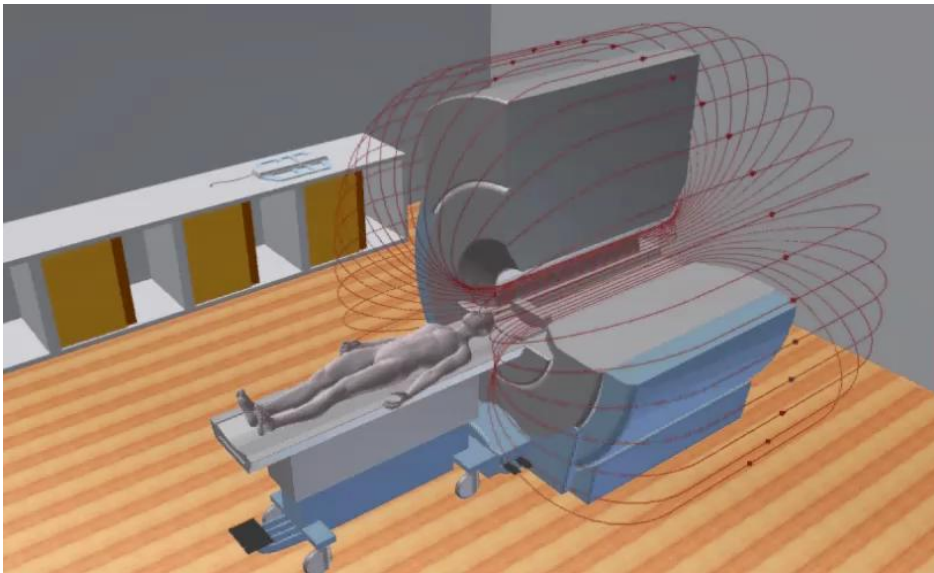
Echographie

- Emission **d'ondes ultrasonores** par une sonde
- Réception par la sonde des ondes ultrasonores réfléchies aux interfaces **d'impédances acoustiques** différentes
- Reconstruction à partir du temps entre émission/réflexion et de l'amplitude des échos
- **Imagerie de coupes**, quasi **temps réel** (possibilité d'explorer un volume facilement)

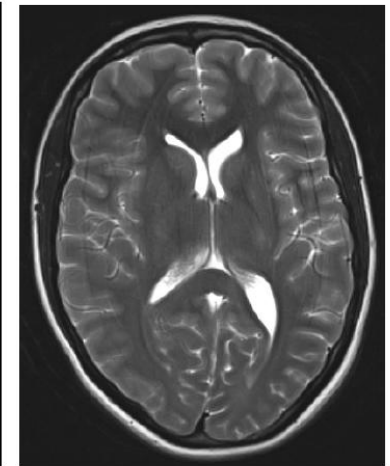


IRM

- Installation du patient dans un fort champ magnétique
- Excitation des tissus par des **ondes radiofréquences (RF)**
- Réception des ondes RF induites par la **relaxation des tissus** par des antennes RF
- Information finale : pondération des images au fonction du temps de relaxation des tissus **T1/T2, densité de protons ...**
- Imagerie de coupe & 3D (assemblage de coupes)



(a) Pondération T_1

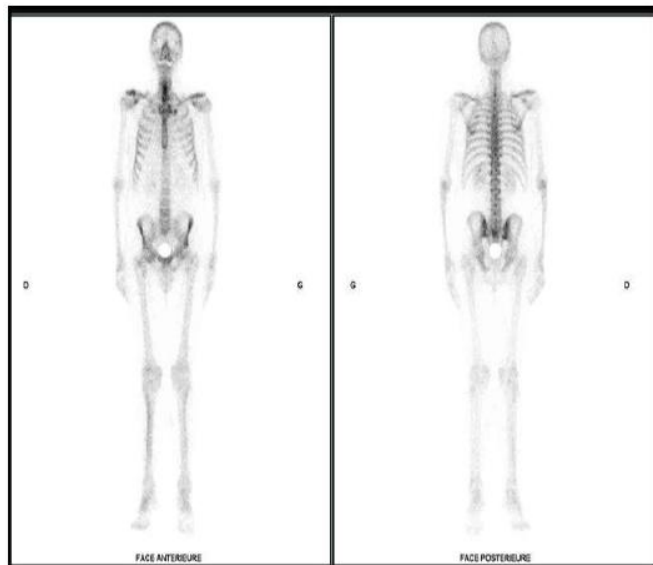
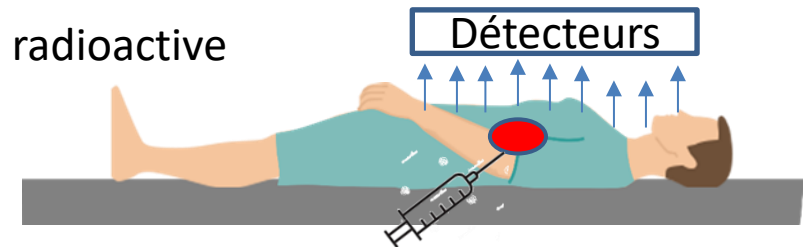


(b) Pondération T_2

Médecine nucléaire : TEMP

Tomoscintigraphie par émission monophotonique (TEMP ou SPECT)

- Injection d'un produit radioactif vectorisé
- Fixation sélective sur un organe et désintégration radioactive
- Emission de rayons γ (photons)
- Détection sur une gamma caméra



Scinti-caen.com®

Scintigraphie osseuse

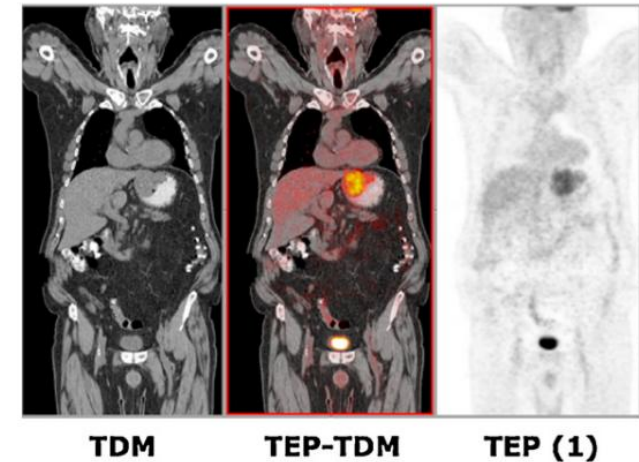
Produit radioactif vectorisé :

- * 1 marqueur radioactif (ex Technétium)
- * 1 vecteur (qui se fixe sur un organe ou pathologie)

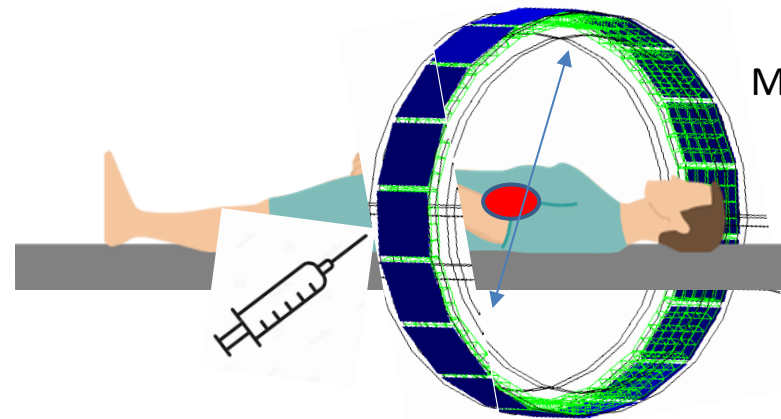


Médecine nucléaire : TEP

- Tomoscintigraphie par émission de positons (TEP ou PET)
 - Injection d'un produit radioactif vectorisé (Fluor 18 ^{18}F + glucose)
 - Fixation sur un organe et désintégration radioactive
 - Emission de β^+ = positon
 - Annihilation du positon par un électron = **émission de rayons γ** de 511 keV dans des directions opposées
 - Détection sur une gamma caméra



Reconstruction : analyse de l'annihilation pour localiser la source



Matrice de détecteurs
autour du patient

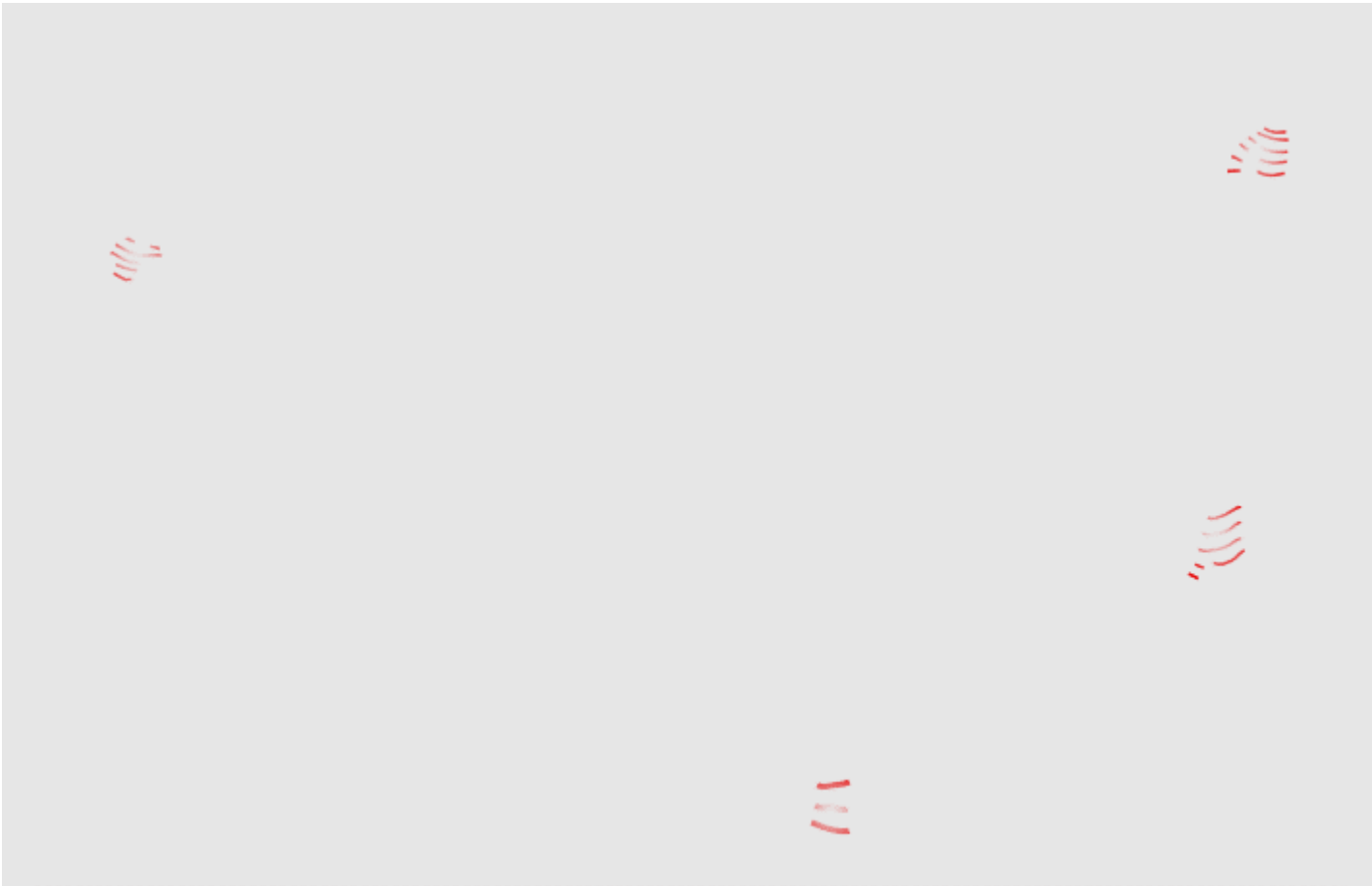
Multimodalité

Image anatomique (IRM, scanner ...)



Multimodalité

Image moléculaire (médecine nucléaire ...)



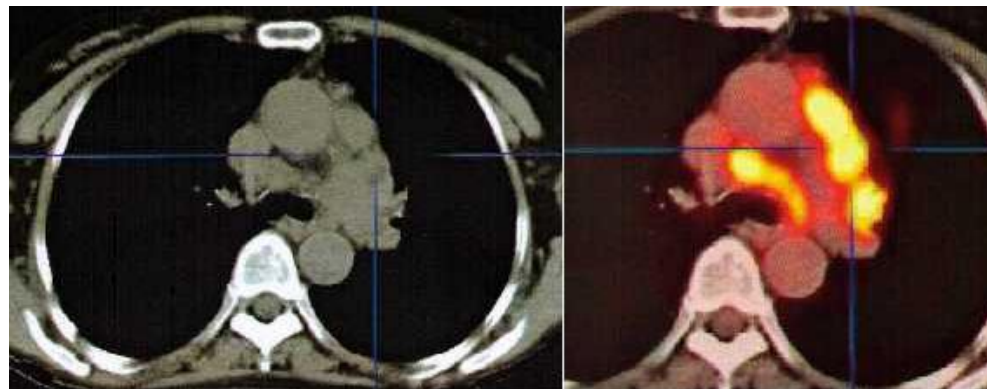
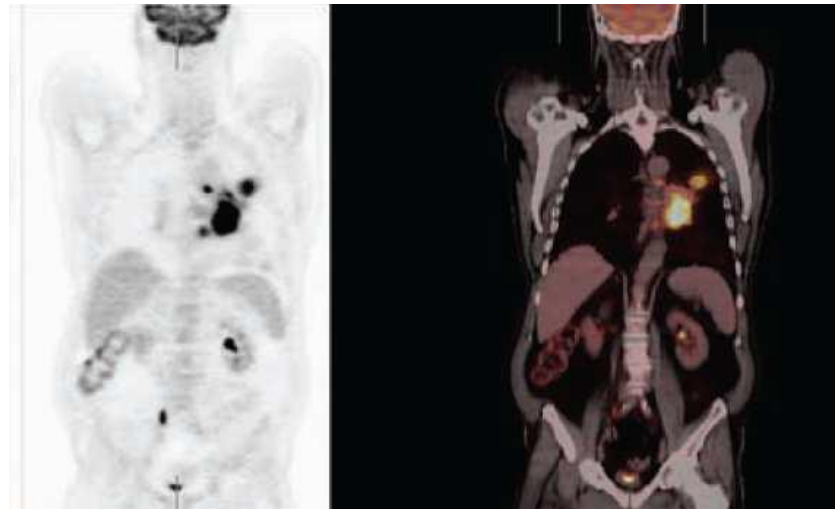
Multimodalité

Image multimodale



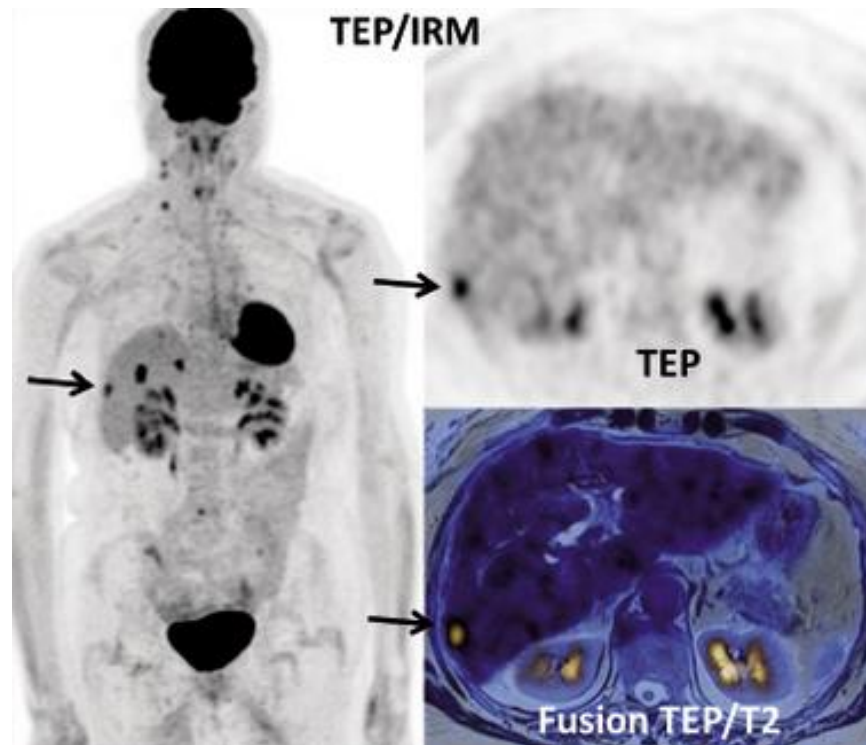
Multimodalité

➡ Association d'un scanner et d'une TEP (TEPscan) : anatomie + métabolisme

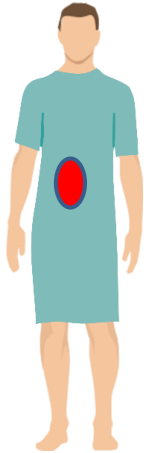


Multimodalité

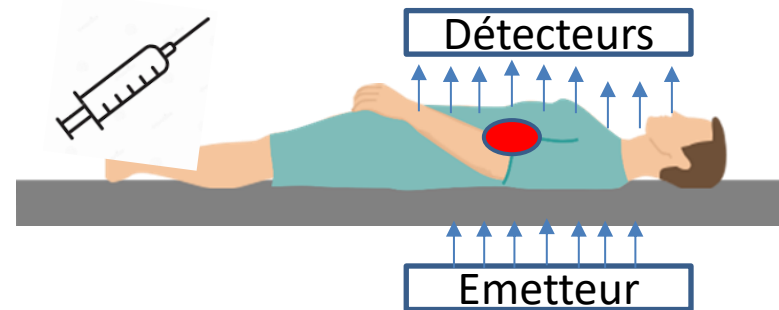
➡ Association d'un IRM et d'une TEP : anatomie + métabolisme



Produit de contraste



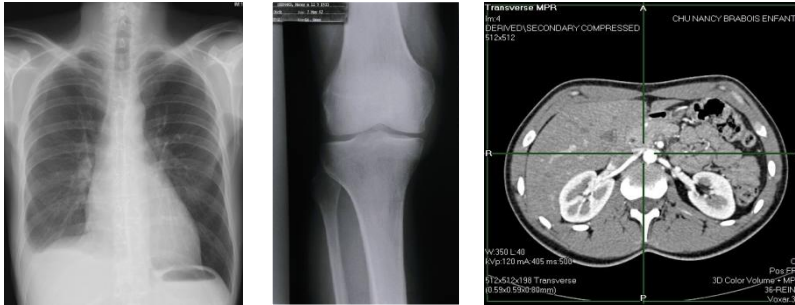
Produit injecté amplifie le phénomène physique et augmente le contraste
Seules les techniques « nucléaires » nécessitent toujours une injection



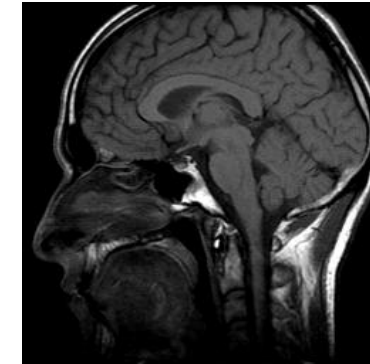
Produit de contraste (Radiologie), Traceur (Médecine nucléaire) :

- Idéalement il doit être spécifique à une pathologie/type de lésion
- Processus standard d'imagerie + amplification avec un produit de contraste
- Médicament = tolérance (toxicité, allergie...) et élimination par l'organisme
- Injecté par voie intraveineuse, inhalé ou ingéré

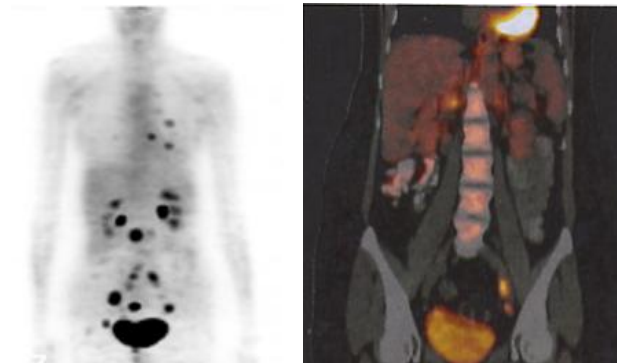
4 modalités d'imagerie = 4 physiques différentes



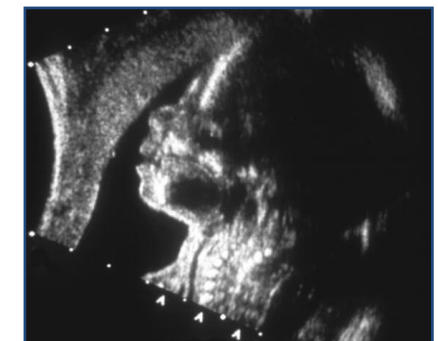
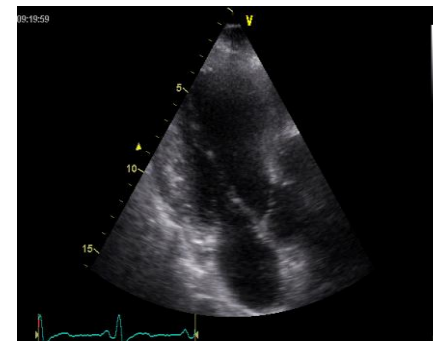
Radiologie Conventionnelle (Standard)
Scanner X, Angiographie X
Rayons X



Imagerie par Résonance Magnétique
Ondes radiofréquence

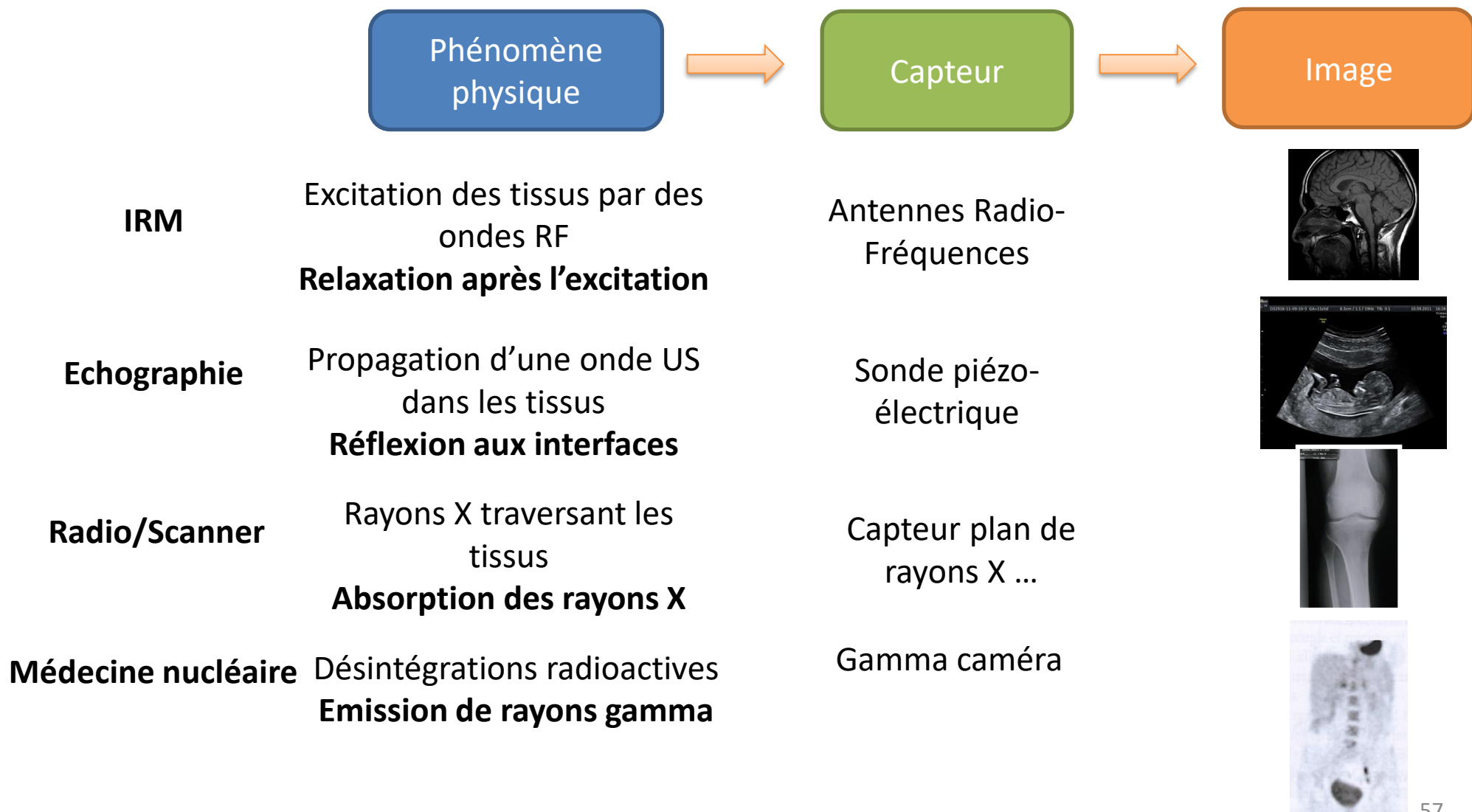


Médecine Nucléaire
SPECT, TEP
Radioactivité, rayons γ

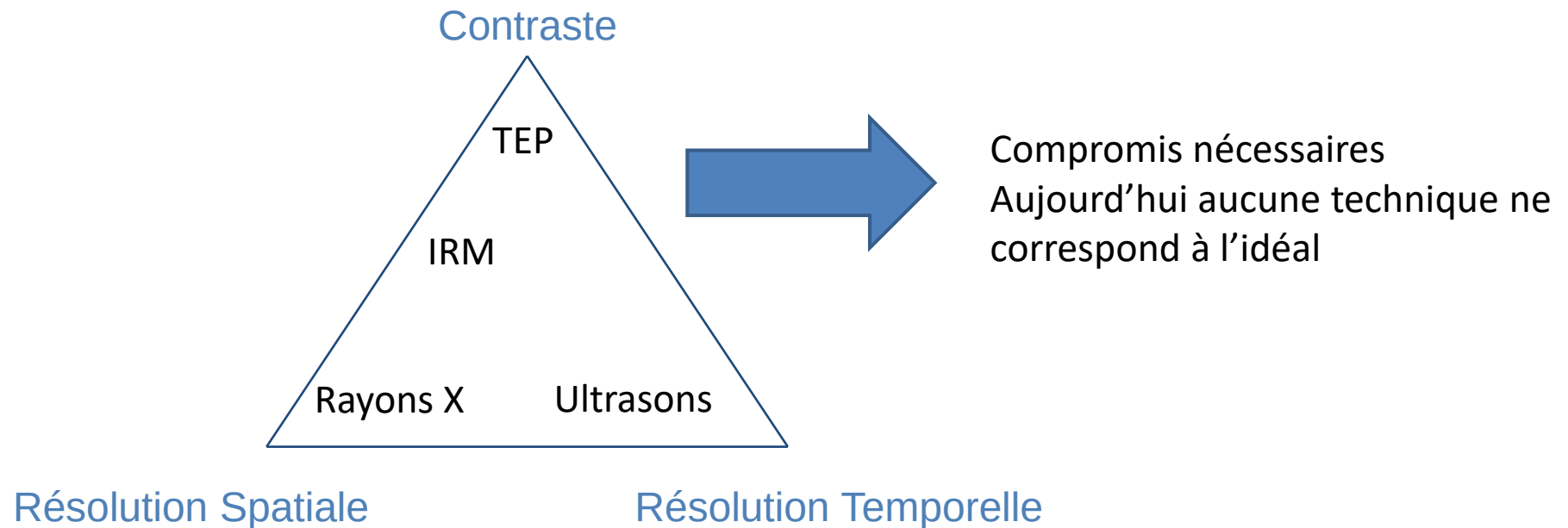


Echographie
Ultrasons

4 modalités d'imagerie = 4 physiques différentes



Compromis en imagerie médicale



Densité : os, calcification ... Technique à base de Rayons X (ionisant)

Cancer : TEP ... (radioactivité)

Tissus mous : IRM ...

Accès et non ionisant : Ultrasons

Les métiers en imagerie

Radiologue / Médecin nucléaire

Diagnostic et intervention

Médecine (bac+6), Spécialité (+5)

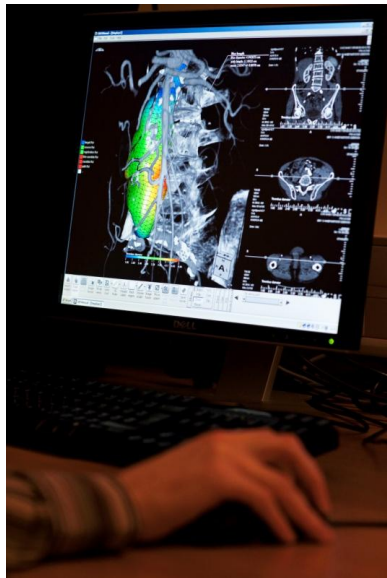


Manipulateur en électroradiologie

Préparation patient, injection

Poste de commande IRM, ...diagnostic..

Bac + 3 (Licence)



Ingénieurs

Développement / maintenance / commercial : vente et achat

Master / école d'ingénieur (bac+5)

Chercheurs

Création de nouvelles technologies (résolutions, contrastes...)

Optimisation de l'utilisation pour mieux détecter, caractériser,...

Universités/INSERM/CNRS/CEA/INRIA.....