

The background is a teal-to-blue gradient with faint, stylized circular patterns and a scale on the left side. The scale has markings from 140 to 260 in increments of 10. There are also some curved arrows and dashed lines scattered across the background.

# TUBE À RAYONS X ET FORMATION DE L'IMAGE RADIOLOGIQUE

N. BRADAI

I. Introduction

II. Production des rayons X

1. Définition

2. Bases physiques

3. Bases technologiques

III. Faisceau de rayon X et image radiante

VI. Transformation de l'image radiante en image lumineuse



# I. INTRODUCTION

## HISTORIQUE

### 1895: LE TUBE DE HITTORF-CROOKES

Le 8 Novembre 1895 : découverte des rayons X par le physicien Wilhelm Röntgen «hasard»

Caractère pénétrant des rayons X



*Une des premières radiographies de l'histoire, la main de Bertha Röntgen, 22 déc 1895, Musée Röntgen, Munich.*



# I. INTRODUCTION HISTORIQUE 1913 : LE TUBE DE COOLIDGE



*détail de l'anode en cuivre avec pièce en tungstène (à gauche)  
et de la cathode (à droite).*

*Tube de Coolidge, 1918. Collection du Centre Antoine Béclère.*



*Antoine Béclère réalisant une radioscopie pulmonaire.  
On peut voir le patient devant le tube à rayons X.*

*Institut Curie.*



# I. INTRODUCTION

## RAPPELS SUR L'ATOME

Les atomes qui sont les constituants élémentaires de la matière sont constitués d'un noyau central entouré d'un nuage électronique.

Energie de liaison  $W$ : énergie qu'il faut fournir à l'atome pour arracher l'électron du champ périmucléaire; cette énergie diminue d'une couche à l'autre quant on s'éloigne du noyau, cette énergie dépend du  $Z^2$

Ainsi  $W_K$  13,6 KeV pour l'hydrogène et 74,4 KeV pour le tungstène

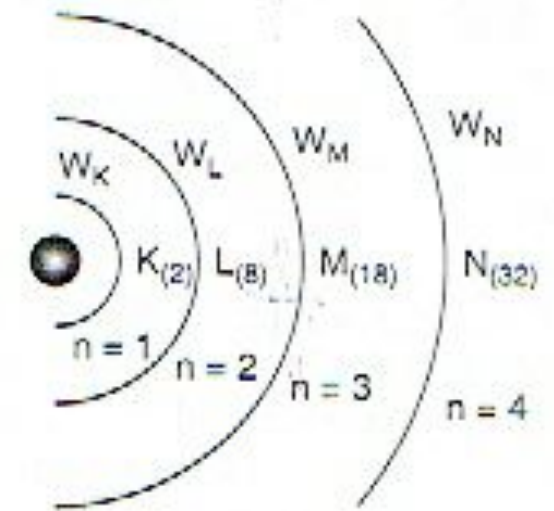


FIG. 2.12, — Orbites électroniques.

# PRODUCTION DES RAYONS X

DÉFINITION

BASES PHYSIQUES

EFFET THERMO-IONIQUE

FAISCEAU D'ÉLECTRON

INTERACTION DES ÉLECTRONS AVEC LA MATIÈRE

INTERACTION AVEC LES ÉLECTRONS PÉRIPHÉRIQUES DE L'ATOME (RAYONNEMENT DE FLUORESCENCE)

INTERACTION AVEC LE CHAMPS ÉLECTRONIQUE PÉRINUCLÉAIRE RAYONNEMENT DE FREINAGE



LE RAYONNEMENT X

SPECTRE DE RAYONNEMENT X

BASES TECHNOLOGIQUES

LE TUBE À RAYONS X

LES DIFFÉRENTS ÉLÉMENTS DU TUBE (TYPE DE DESCRIPTION TDD) : TUBE DE COOLIDGE

FONCTIONNEMENT DU TUBE

CARACTÉRISTIQUES THERMIQUES

USURE DU TUBE RADIOGENE



## II. PRODUCTION DES RAYONS X

### 1. BASES PHYSIQUES



#### EFFET THERMO-IONIQUE

Libération des électrons avec création d'un véritable « nuage électronique » autour du filament chauffé, c'est l'effet thermo-ionique ou effet Edison

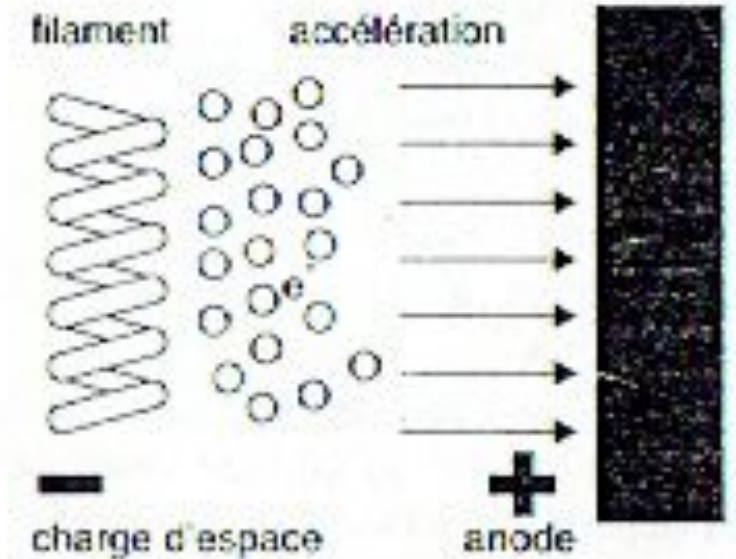


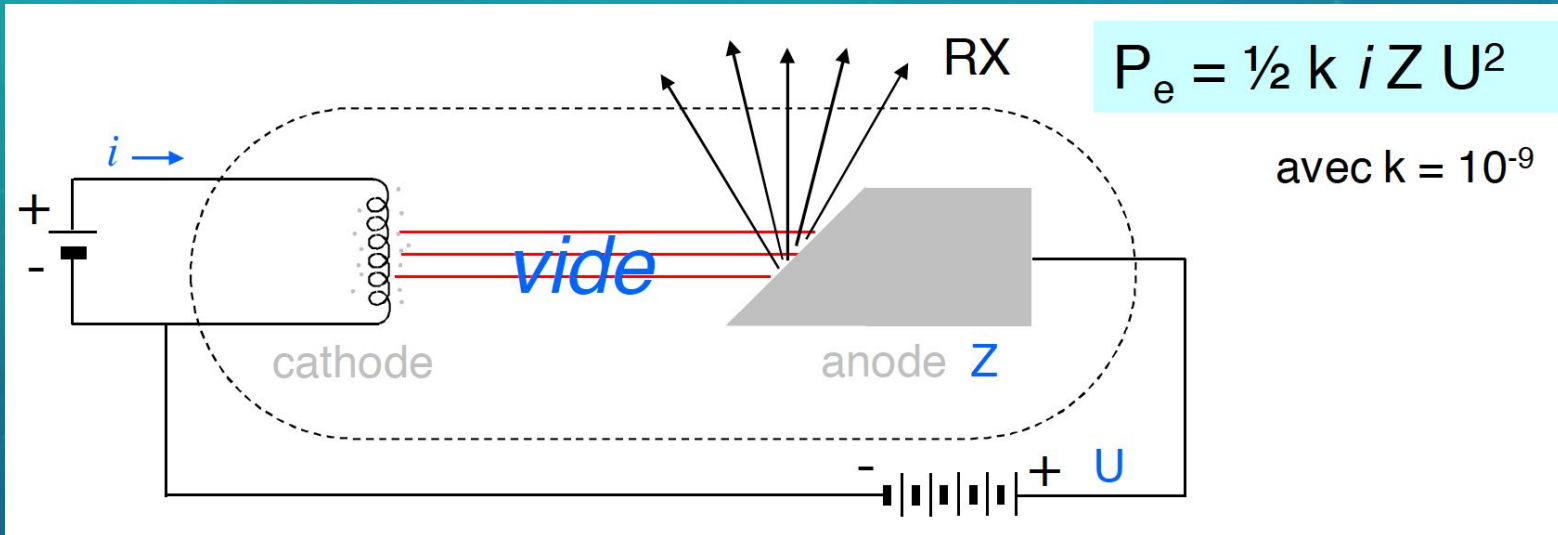
FIG. 3.1. — Principe de la valve de Fleming.

## II. PRODUCTION DES RAYONS X

### 1. BASES PHYSIQUES



#### EFFET THERMO-IONIQUE



Le filamant du tungstène est placé dans une ampoule de verre où règne le vide

Cette ampoule contient également une plaque cylindrique portée par un potentiel positif (anode) par rapport au filament (cathode)



## II. PRODUCTION DES RAYONS X

### 1. BASES PHYSIQUES



## FAISCEAU D'ÉLECTRONS

- Dans un tube à rayons X type Coolidge les électrons sont accélérés par une forte différence de potentiel (plusieurs milliers de volts). Ils suivent les lignes de force du champ électrique.
- À une ddp de 120 K volts ils ont une **énergie** de 120 KeV
- À une ddp de 100 K volts la vitesse de électrons est 180 000 Km/s

## II. PRODUCTION DES RAYONS X

### 1. BASES PHYSIQUES

#### INTERACTION DES ÉLECTRONS AVEC LA MATIÈRE

Lorsque les électrons accélérés percutent une cible matérielle, il y a perte d'énergie et émission du rayonnement X.

Deux types d'interactions électron/matière peuvent être individualisés:

- Interaction avec les électrons périphériques de l'atome
- Interaction avec le champs électronique périnucléaire

## II. PRODUCTION DES RAYONS X

### 1. BASES PHYSIQUES

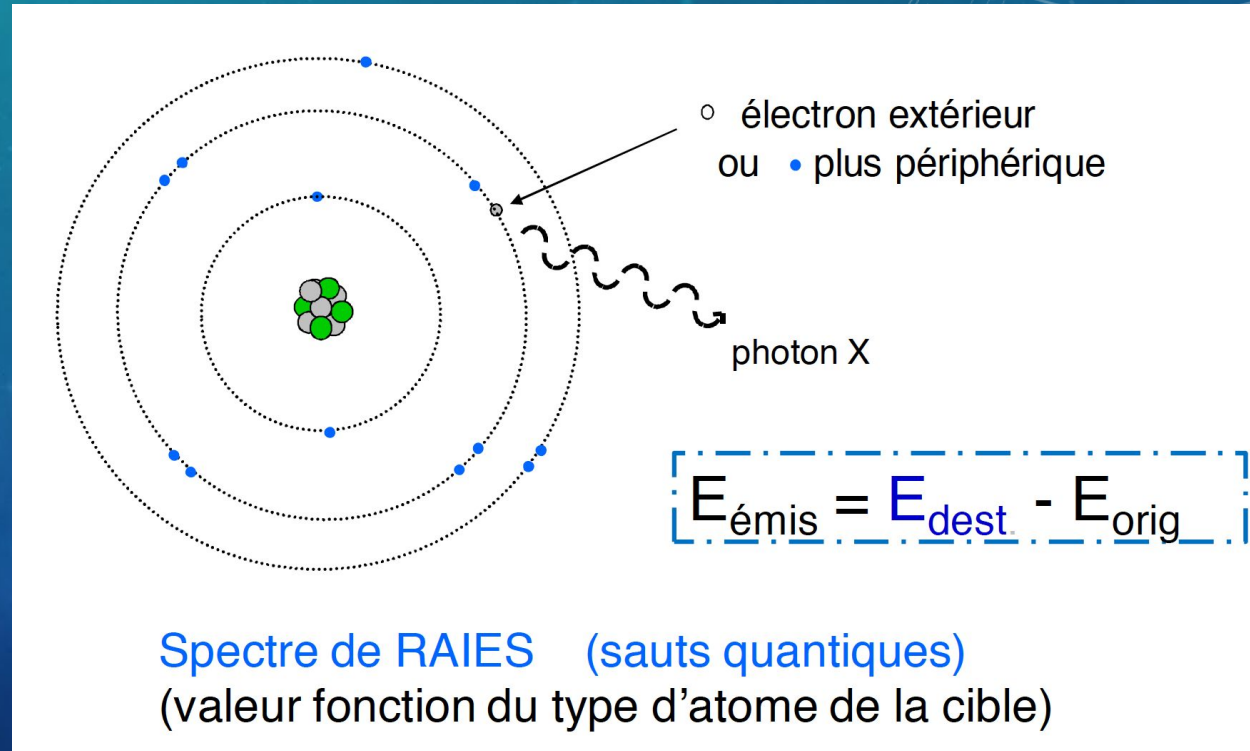
#### INTERACTION DES ÉLECTRONS AVEC LA MATIÈRE

INTERACTION AVEC LES ÉLECTRONS PÉRIPHÉRIQUES DE L'ATOME  
RAYONNEMENT DE FLUORESCENCE



En cas d'interaction avec les électrons des couches profondes ils se produit une **émission de fluorescence** avec des photon d'énergie relativement élevée.

Si par contre, c'est un électron des couches périphérique qui est éjecté, il y a émission de photons peu énergétiques qui seront absorbés par la matière environnante avec émission de chaleur.





## II. PRODUCTION DES RAYONS X

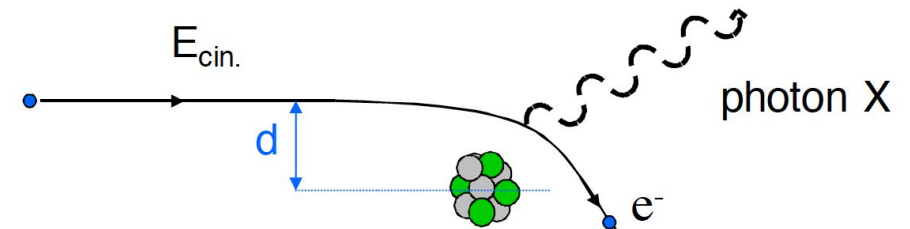
### 1. BASES PHYSIQUES

#### INTERACTION DES ÉLECTRONS AVEC LA MATIÈRE

INTERACTION AVEC LE CHAMPS ÉLECTRONIQUE PÉRINUCLÉAIRE  
RAYONNEMENT DE FREINAGE

L'électron est soumis à une accélération centripète intense (charge positive du noyau), il rayonne de l'énergie sous forme d'un photon, il change de direction et se trouve finalement ralenti; le rayonnement émis est appelé **rayonnement de freinage**

Le rayonnement de freinage ne survient que dans la proportion de 1 pour 100 à 1 pour 1000 par rapport au rayonnement de fluorescence, si bien que les interactions électron/matière **produisent plus de la chaleur que de rayon X**



L'énergie cinétique perdue est fonction de la distance  $d$  entre trajectoire et axe du noyau.

#### Spectre CONTINU

(valeur maximale  $E_{\max} = E_{\text{cin.}}$  de la particule incidente)

## II. PRODUCTION DES RAYONS X

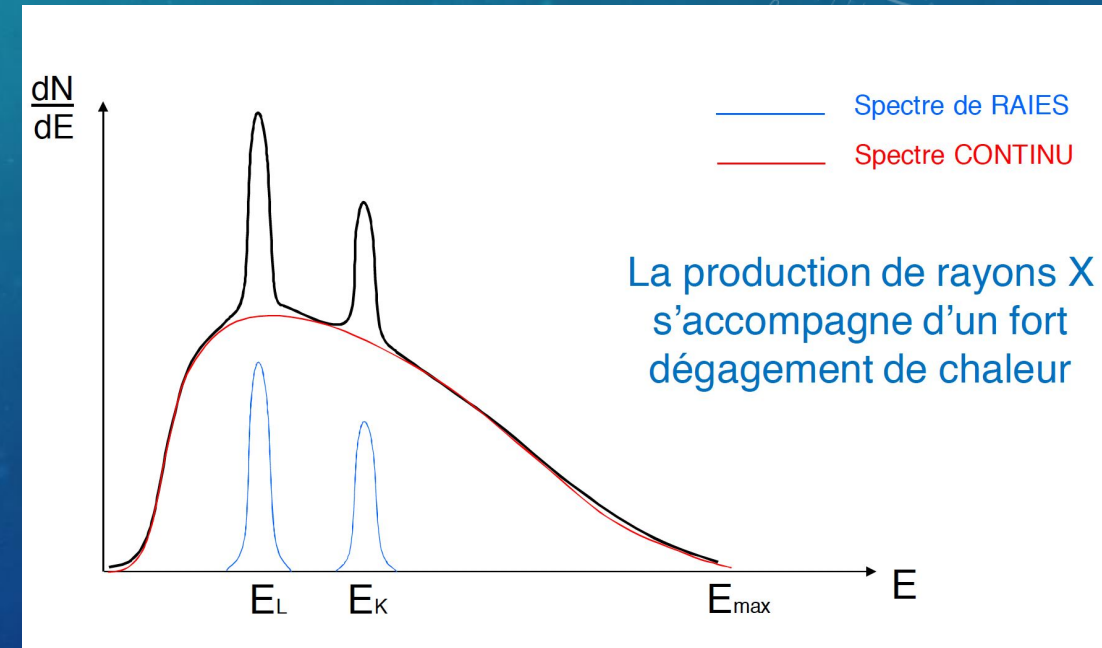
### 1. BASES PHYSIQUES

#### LE RAYONNEMENT X

##### SPECTRE DE RAYONNEMENT X



- Le rayonnement X obtenu a la particularité d'être polychromatique, poly énergétique c'est à dire formé d'énergies (donc de longueur d'onde) différentes
- Le spectre obtenu est complexe, formé par la superposition de 2 spectres un continu prédominant et l'autre discontinu
- Avec une cible en tungstène seule la raie de 69 KeV est utilisée (arrachement des électrons de la couche K entraîne l'émission de photons énergétiques de fluorescence)



## II. PRODUCTION DES RAYONS X

### 2. BASES TECHNOLOGIQUES

#### LE TUBE À RAYONS X



- Le tube est l'élément essentiel d'une chaîne radiogène
- Il est utilisé en radiologie conventionnelle, vasculaire numérique et en tomodensitométrie (scanner)
- Il doit répondre à deux qualités indispensables mais contradictoires :
  - **Grande puissance** : afin de diminuer le flou de mouvement
  - **Grande finesse du foyer** pour diminuer le flou géométrique



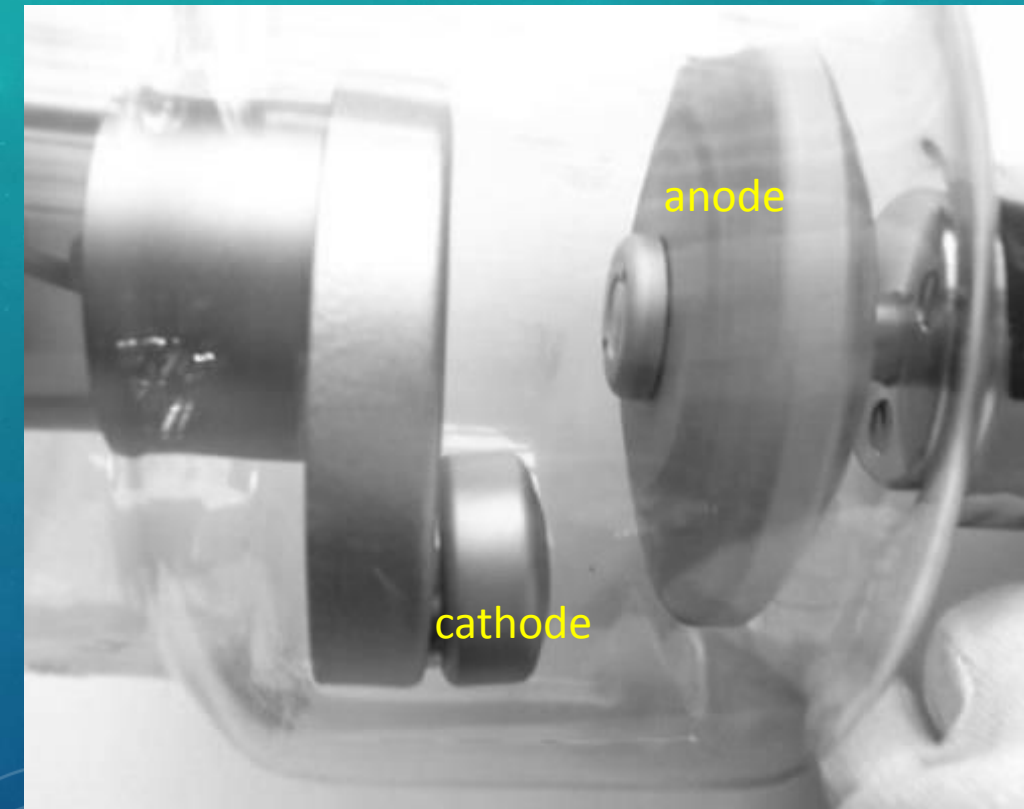
## II. PRODUCTION DES RAYONS X

### 2. BASES TECHNOLOGIQUES

#### LE TUBE À RAYONS X

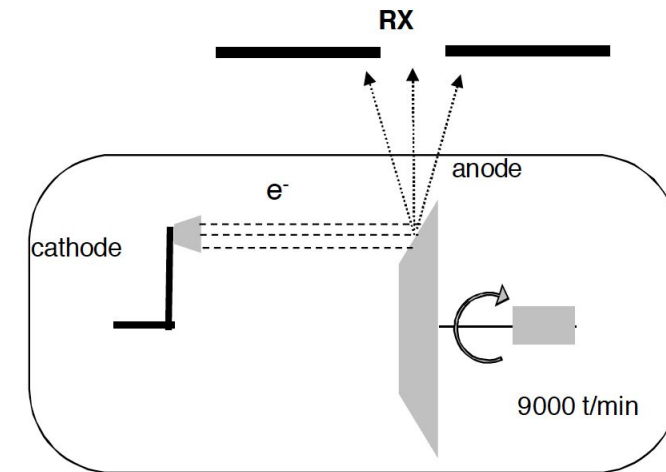
LES DIFFÉRENTS ÉLÉMENTS DU TBE TDD TUBE DE COOLIDGE

LA CATHODE, L'ANODE ET L'AMPOULE OÙ RÈGNE LE VIDE



La cathode est légèrement décalée pour être en périphérie de l'anode, disque tournant.

Tube Philips Metalix, 1924. Collection du Centre Antoine Bécère.



#### Avantages :

- meilleure évacuation de la chaleur
- moindre détérioration de l'anode
- durée allongée de fonctionnement

## II. PRODUCTION DES RAYONS X

### 2. BASES TECHNOLOGIQUES

#### LE TUBE À RAYONS X

LES DIFFÉRENTS ÉLÉMENTS DU TBE TDD TUBE DE COOLIDGE  
LA CATHODE, L'ANODE ET L'AMPOULE OÙ RÈGNE LE VIDE

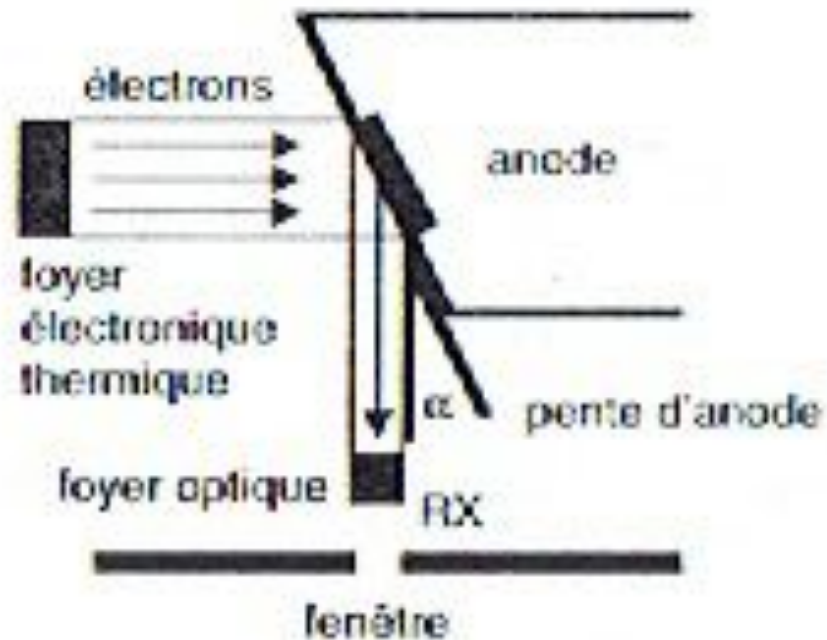


FIG. 3.14. — Les différents foyers d'une anode fixe.

## II. PRODUCTION DES RAYONS X

### 2. BASES TECHNOLOGIQUES

#### LE TUBE À RAYONS X

##### USURE DU TUBE RADIOGÈNE



- Le vieillissement du tube est dû à l'échauffement répété de la piste d'anode
- Apparition de microfissures
- Les rayons X nés au fond des fissures sont arrêtés par les aspérités de voisinage avec baisse du rendement du tube
- Durée de vie du tube radiogène



# FAISCEAU DE RAYON X ET IMAGE RADIANTE

CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES

ÉNERGIE ET PUISSANCE RAYONNÉE

DIRECTION ET SECTION DE FAISCEAU

DURETÉ DES RAYONS X

PROPRIÉTÉ OPTIQUE DES RAYON X

FORMATION DE L'IMAGE RADIANTE

INTERACTION DES PHOTONS AVEC LA MATIÈRE

DIFFÉRENTES INTERACTIONS

INTERACTION AVEC LES ÉLECTRONS PÉRIPHÉRIQUES : **EFFET COMPTON**

INTERACTION AVEC LES ÉLECTRONS PROFOND **EFFET PHOTOÉLECTRIQUE**

ATTÉNUATION DU FAISCEAU

CARACTÉRISTIQUES DE L'IMAGE RADIANTE

RAYONNEMENT DIFFUSÉ

FORMATION GÉOMÉTRIQUE DES IMAGES

FORMATION DES CONTOURS

CONTRASTE DE L'IMAGE RADIANTE

TRAITEMENT DE L'IMAGE RADIANT

LES MODIFICATEURS DU CONTRASTE

LUTTE CONTRE LE RAYONNEMENT DIFFUSÉ

EN ÉVITANT SA FORMATION

MOYEN ÉVITANT QUE LE DIFFUSÉ NE PARVienne SUR LA FILM

LUTTE CONTRE LES FLOUS

LUTTE CONTRE LA CONFUSION DES PLANS

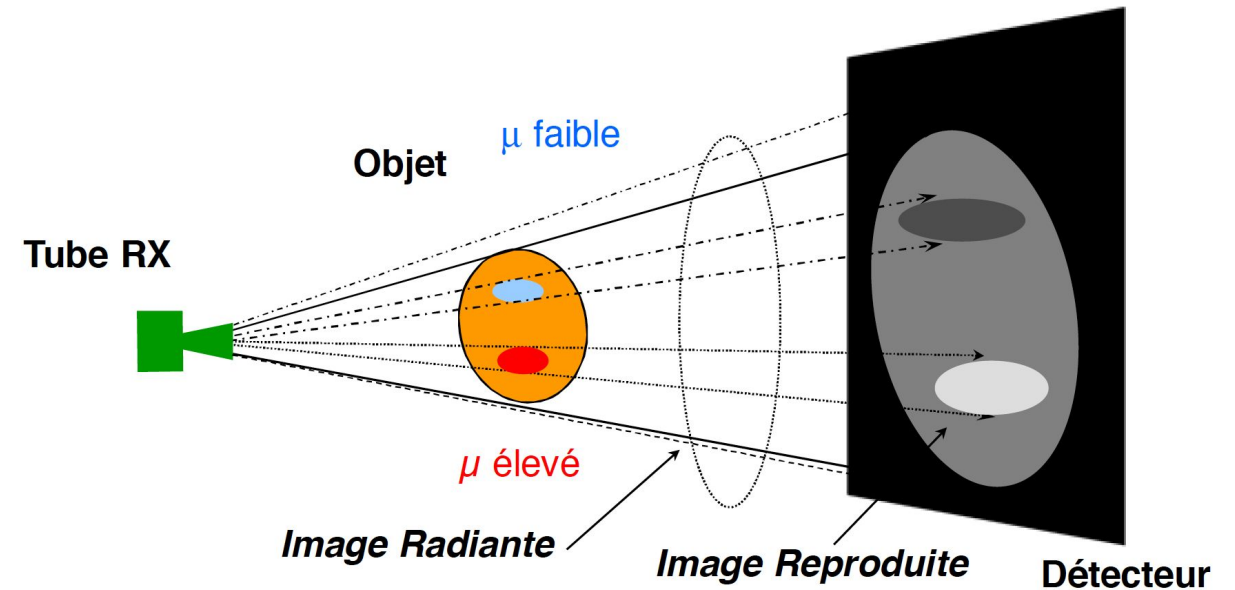
ACTION SUR LES PROJECTIONS CONIQUES



### III. FAISCEAU DE RAYONS X ET IMAGE RADIANTE

- Le radiodiagnostic consiste à explorer les structures anatomiques internes d'un sujet à l'aide d'une image formée par un faisceau de rayons X.
- Le faisceau est plus ou moins absorbé selon les structures rencontrées et il perd de son homogénéité: ces créations « d'ombre portées » constituent **l'image radiante**.

*Image de l'atténuation d'un faisceau de rayons X par le tissu traversé*





### III. FAISCEAU DE RAYONS X

#### 1. CARACTERISTIQUES PIHYSIQUES

Énergie et puissance rayonnées  
Direction et section de faisceau  
Dureté des rayons X

- Puissance émise par le tube  $P_e = \frac{1}{2} k.Z.I.U^2$
- Energie reçue par le détecteur  $E = \frac{1}{2} k.Z.I.U^2 t. \frac{1}{4\pi.d^2}$

Paramètre	Facteur	Noircissement
Nombre de photons	$I$ ou $t \nearrow$	$\nearrow$
Energie des photons	$V \nearrow$	$\nearrow$
Fluence (E/S)	$d \nearrow$	$\searrow$

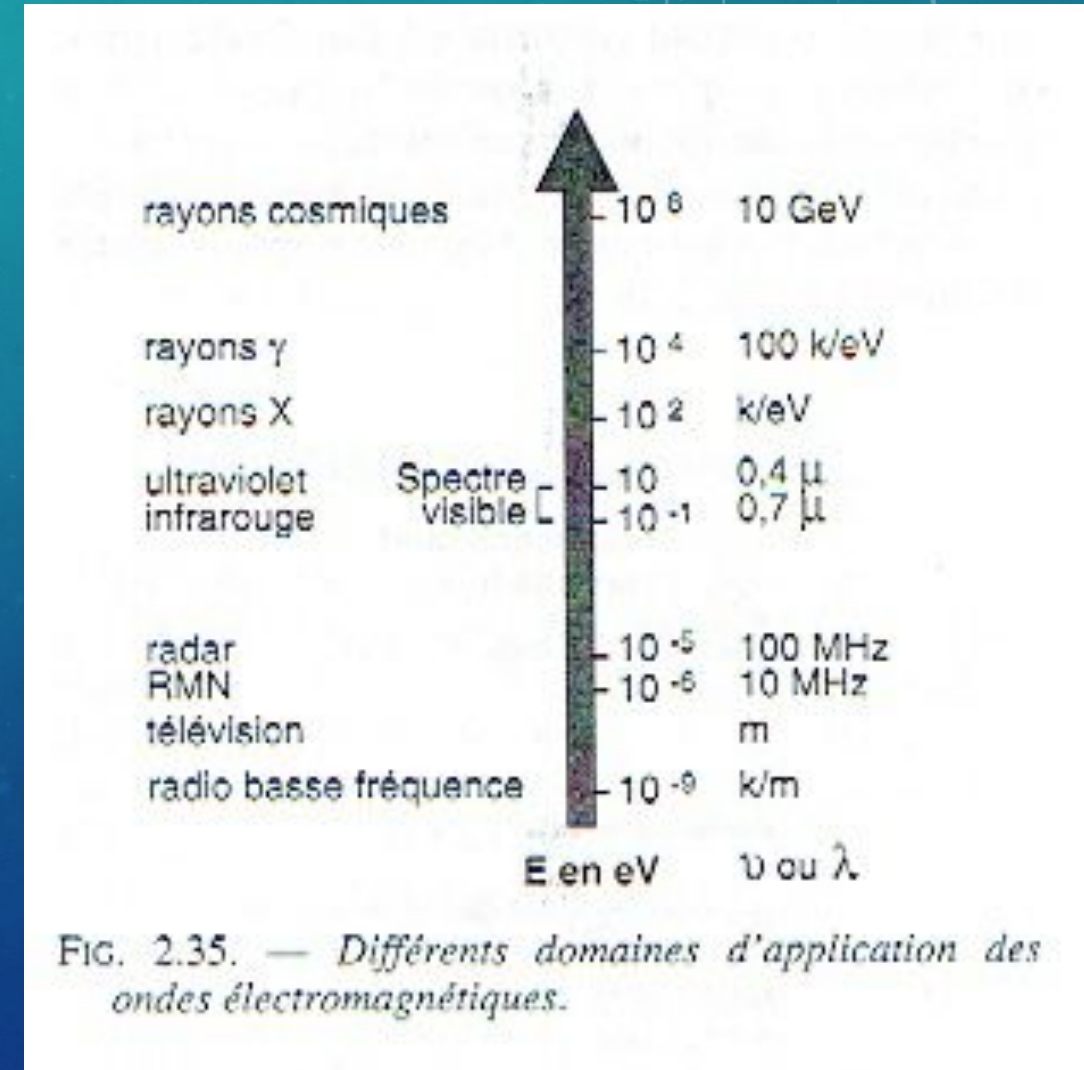
Énergie et puissance rayonnées



### III. FAISCEAU DE RAYONS X

#### 2. PROPRIÉTÉS OPTIQUES

- Les rayons X sont des rayonnements électro-magnétique, ils se déplacent en droite ligne dans le vide à la vitesse de 300000 Km/s
- Comme la lumière ils peuvent traverser la matière, y subir interférences, se réfléchir, se réfracter
- 10000 fois plus énergétiques que la lumière explique leur pouvoir pénétrant





### III. IMAGE RADIANTE

#### 1. FORMATION DE L'IMAGE RADIANTE

##### INTERACTION DES PHOTONS AVEC LA MATIÈRE



Lorsque un faisceau de rayons X pénètre dans un milieu naturel on constate une disparition progressive des photons qui le constituent, cette diminution est appelée atténuation et résulte de l'interaction d'un certain nombre de photons avec les atomes de la matière traversée. Deux type d'interactions sont individualisées :

- Interaction des photons avec les électrons périphériques : **effet Compton**
- Interaction des photons avec les électrons profonds : **effet photoélectrique**

### III. IMAGE RADIANTE

#### 1. FORMATION DE L'IMAGE RADIANTE

##### ATTÉNUATION DU FAISCEAU

L'image Radiante n'est pas l'image de l'objet lui-même mais la projection sur un plan des valeurs  $\mu$  des coefficients d'atténuation de chaque structure atteinte par les photons X.

L'atténuation dépend du produit  $\mu \cdot x$

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x}$$

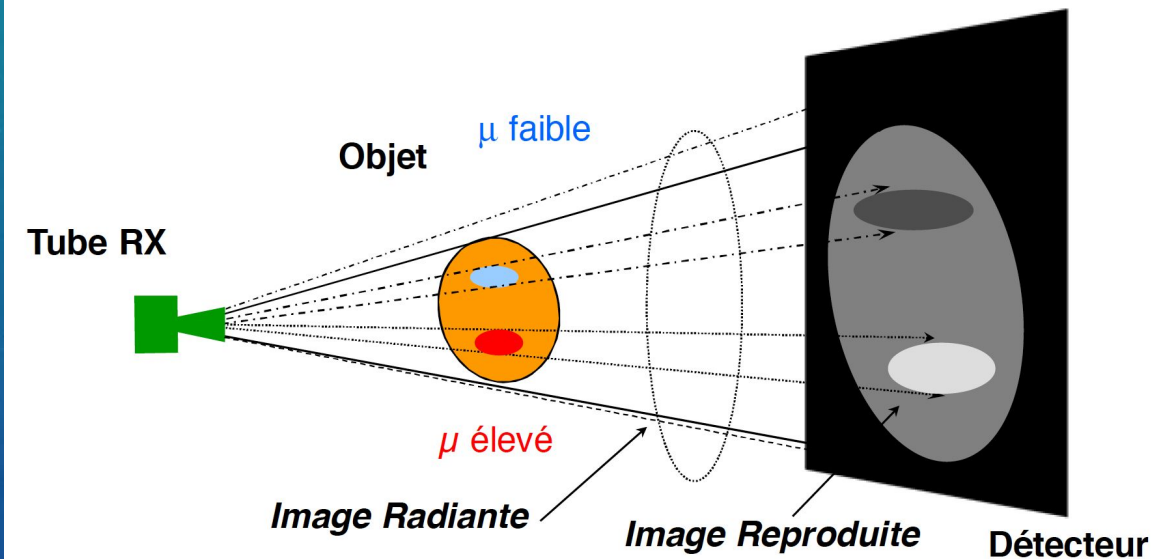
Le noircissement du film est la traduction visuelle des variations locales du facteur d'atténuation.

$\mu$  : coef. atténuation

$x$  : distance traversée



*Image de l'atténuation d'un faisceau de rayons X par le tissu traversé*





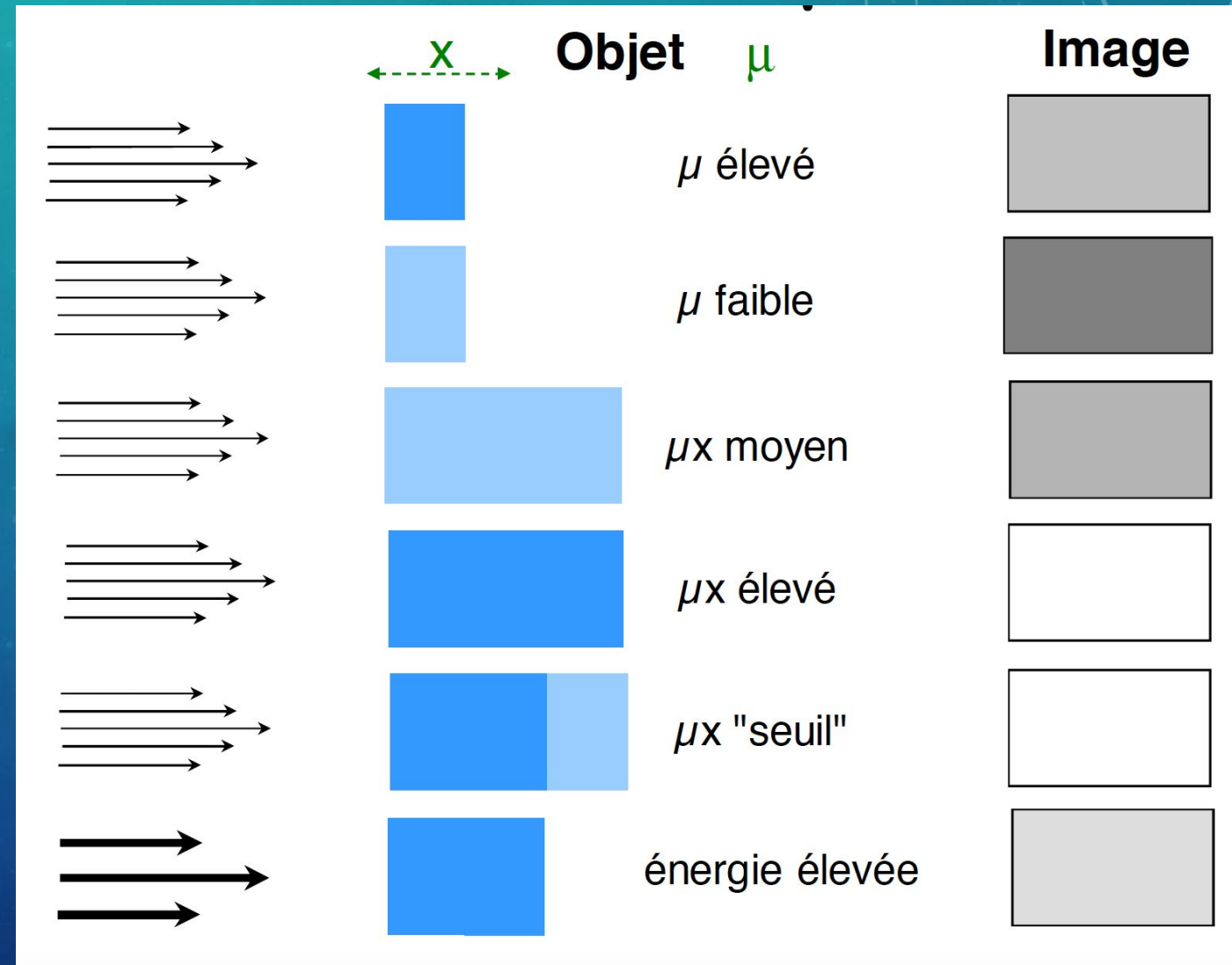
### III. IMAGE RADIANTE

#### 1. FORMATION DE L'IMAGE RADIANTE

##### ATTÉNUATION DU FAISCEAU

Influence de  $E$ ,  $x$ ,  $\mu$

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x}$$





### III. IMAGE RADIANTE

## 2. CARACTÉRISTIQUES DE L'IMAGE RADIANTE

### OPACITÉS RADIOLOGIQUES

Les structures anatomiques du sujet radiographié traversées par le rayonnement ont des « **opacités radiologiques** » différentes c'est à dire elles atténuent différemment le faisceau de rayons X

Il existe 4 densité radiologiques fondamentales en radiographie:

**Le gaz, la graisse, l'eau et le métal**; lorsque le contraste naturel entre deux structures est insuffisant l'utilisation de produit de contraste permet de les différencier (iode, baryte )

### III. IMAGE RADIANTE

## 2. CARACTÉRISTIQUES DE L'IMAGE RADIANTE

### RAYONNEMENT DIFFUSÉ



- Origine: les interactions du rayonnement incident avec l'organisme provoquent la formation de photons secondaires diffusés, émis dans toutes les directions de l'espace, **plus souvent dûs à l'effet Compton** et rarement aux photons de fluorescence. Ces photons diffusés ne sont pas porteurs d'information et brouille l'image radiante en diminuant le contraste
- Facteurs agissant sur le rayonnement diffusé:
  - Section du faisceau de rayonnement X
  - Epaisseur traversée
  - Energie du photon incident : plus important en haute tension car effet Compton majoré
  - Numéro atomique du milieu: les tissus mous génèrent plus de rayons diffusés car les effet photo-électriques sont plus rares que dans les structures osseuses

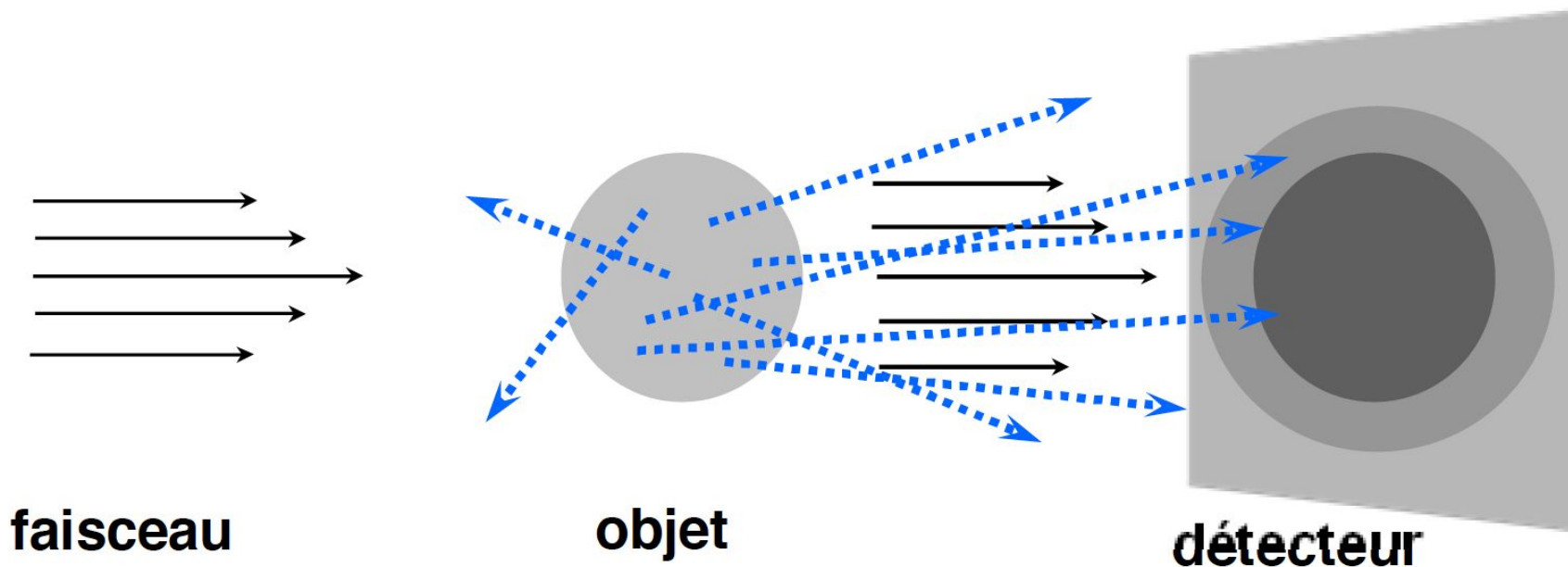


### III. IMAGE RADIANTE

## 2. CARACTÉRISTIQUES DE L'IMAGE RADIANTE

### RAYONNEMENT DIFFUSÉ

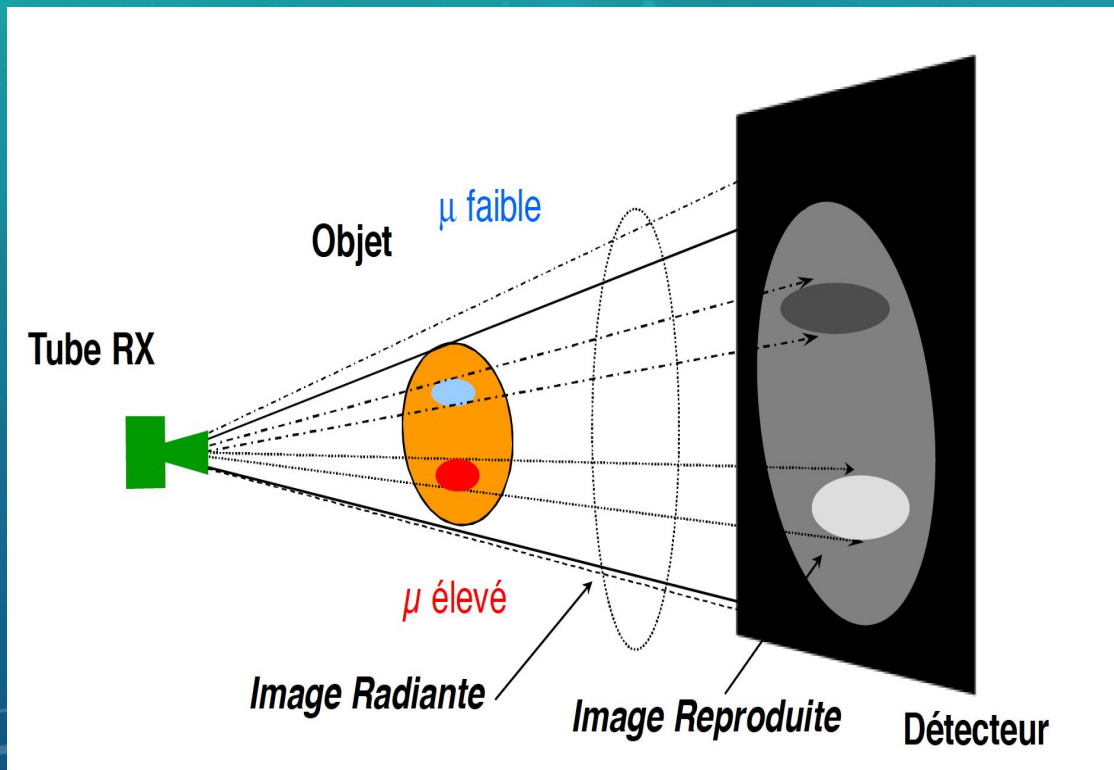
Le Rayonnement diffusé est émit dans toutes les directions  
Le rayonnement transmis est monodirectionnel



### III. IMAGE RADIANTE

## 2. CARACTÉRISTIQUES DE L'IMAGE RADIANTE

### FORMATION GÉOMÉTRIQUE DES IMAGES



### les superpositions

- "addition" de l'atténuation

$\mu$  faible

$\mu$  élevé

- **Solutions :**
  - clichés de profils
  - positionnement du patient
  - compression (ballon...)

- Loi de projection conique

- Loi de confusion des plans

### III. IMAGE RADIANTE

## 2. CARACTÉRISTIQUES DE L'IMAGE RADIANTE

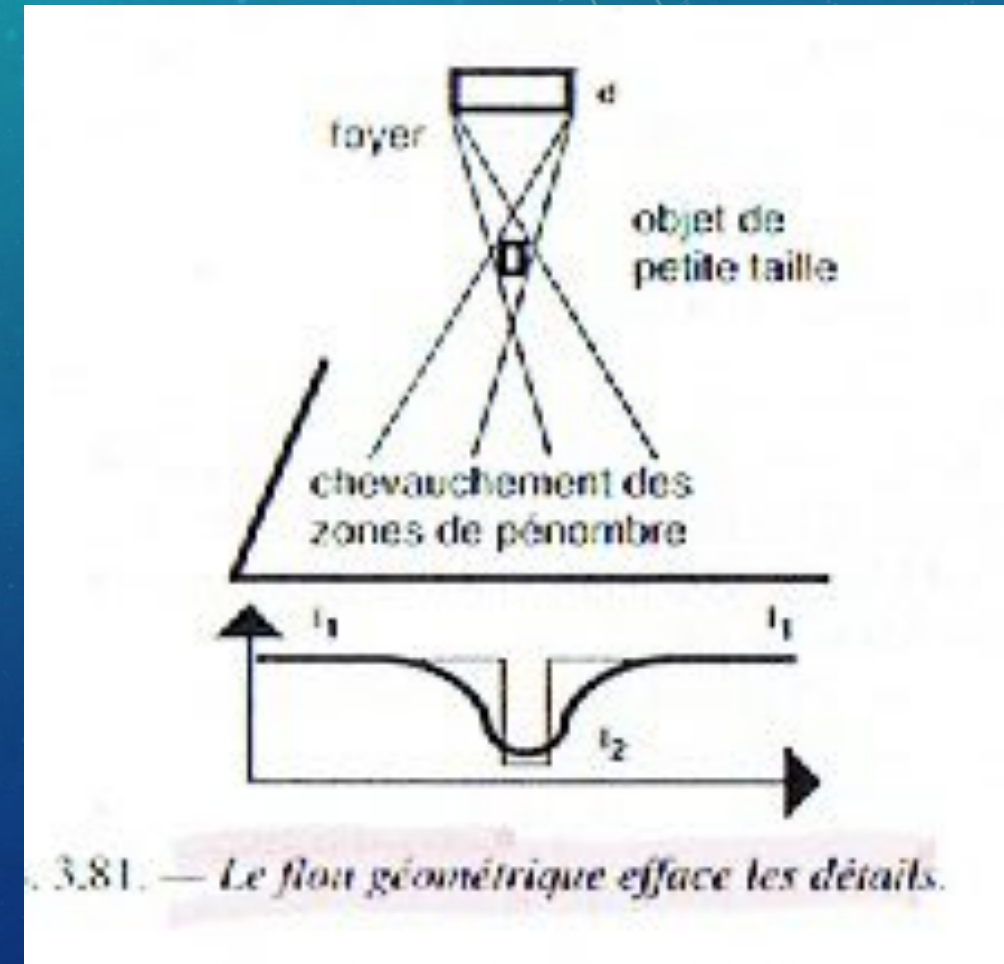
### FORMATION GÉOMÉTRIQUE DES IMAGES

### FLOU GÉOMÉTRIQUE

Manque de netteté de l'image, d'autant plus grande que:

- La dimension du foyer est grande
- La structure radiographiée est éloignée du plan de projection
- la structure radiographiée est proche du foyer

si la structure radiographiée est plus petite que la dimension du foyer il y aura une diminution du contraste pouvant aller jusqu'à l'effacement





### III. IMAGE RADIANTE

## 2. CARACTÉRISTIQUES DE L'IMAGE RADIANTE

### FORMATION GÉOMÉTRIQUE DES IMAGES

#### FLOU CINÉTIQUE

Flou des contours d'une structure en mouvement

Le flou cinétique affecte :

- Le cœur
- Les poumons

Solutions :

- Immobilisation - apnée
- Courte durée de prise d'image (1/10e de seconde)
- Séquence rapide de clichés : 50 à 100 images/s
- Synchronisation

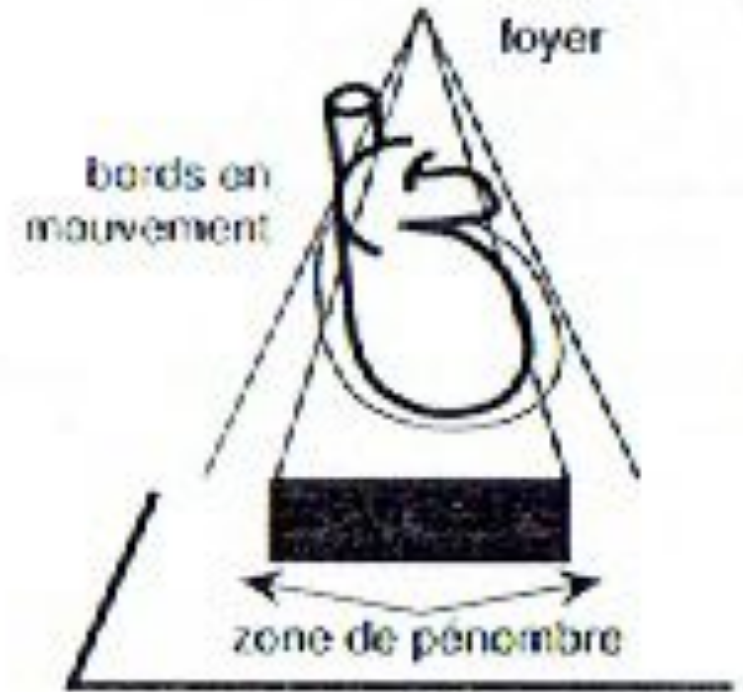


Fig. 3.82. — Flou cinétique.



### III. IMAGE RADIANTE

## 2. CARACTÉRISTIQUES DE L'IMAGE RADIANTE

### FORMATION DES CONTOURS

Pour qu'il y ait une formation des contours d'un organe il faut que l'intensité de l'image radiante présente de brusques discontinuités c'est-à-dire un gradient important

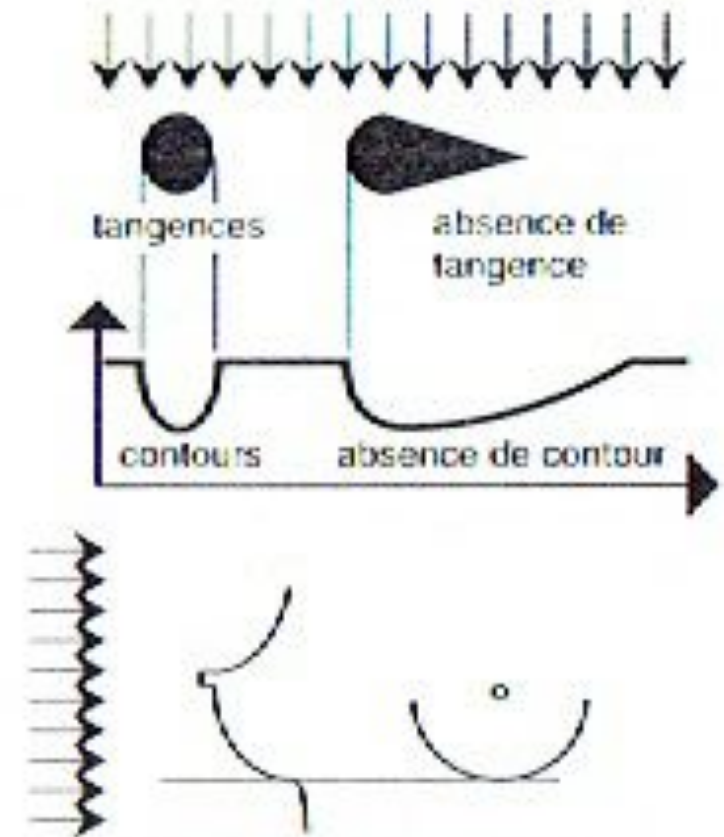


FIG. 3.83. — Formation des contours.

### III. IMAGE RADIANTE

#### 3. TRAITEMENT DE L'IMAGE RADIANTE

##### LES MODIFICATEURS DU CONTRASTE



Adapter les réglages de V (kV) et de i .t (mAs)

Diminuer le  $\mu$  d'un milieu

- air (poumon – digestif) remplace localement le tissu
- Clichés en inspiration-expiration, eau gazeuse...

Renforcer le  $\mu$  d'un milieu

- Sels de baryum (tube digestif) remplissent une cavité
- Composés iodés (vaisseaux) se diluent dans le sang
- Repères métalliques (clips et prothèse) implantés

la distance focale doit être respectée



### III. IMAGE RADIANTE

#### 3. TRAITEMENT DE L'IMAGE RADIANTE

##### LES MODIFICATEURS DU CONTRASTE



Adapter les réglages de  $V$  (kV) et de  $i.t$  (mAs)

Choix de la tension : le réglage de la tension est à la fois le plus important et le plus efficace, son augmentation améliore la pénétration des rayons X, c'est le paramètre à régler en premier

Réglage de l'intensité et du temps de pose: la densité photographique est proportionnelle au produit  $It$  (mAs);

	Examen	d	Tension	Intensité	Temps de pose
a	Poumon face	1,8 m	135 kV	250 mA	20 ms
b	Poumon face (enfant)	1,5 m	80 kV	250 mA	16 ms
c	Gril costal	1 m	55 kV	520 mA	250 ms
d	Abdomen	1 m	70 kV	600 mA	200 ms

### III. IMAGE RADIANTE

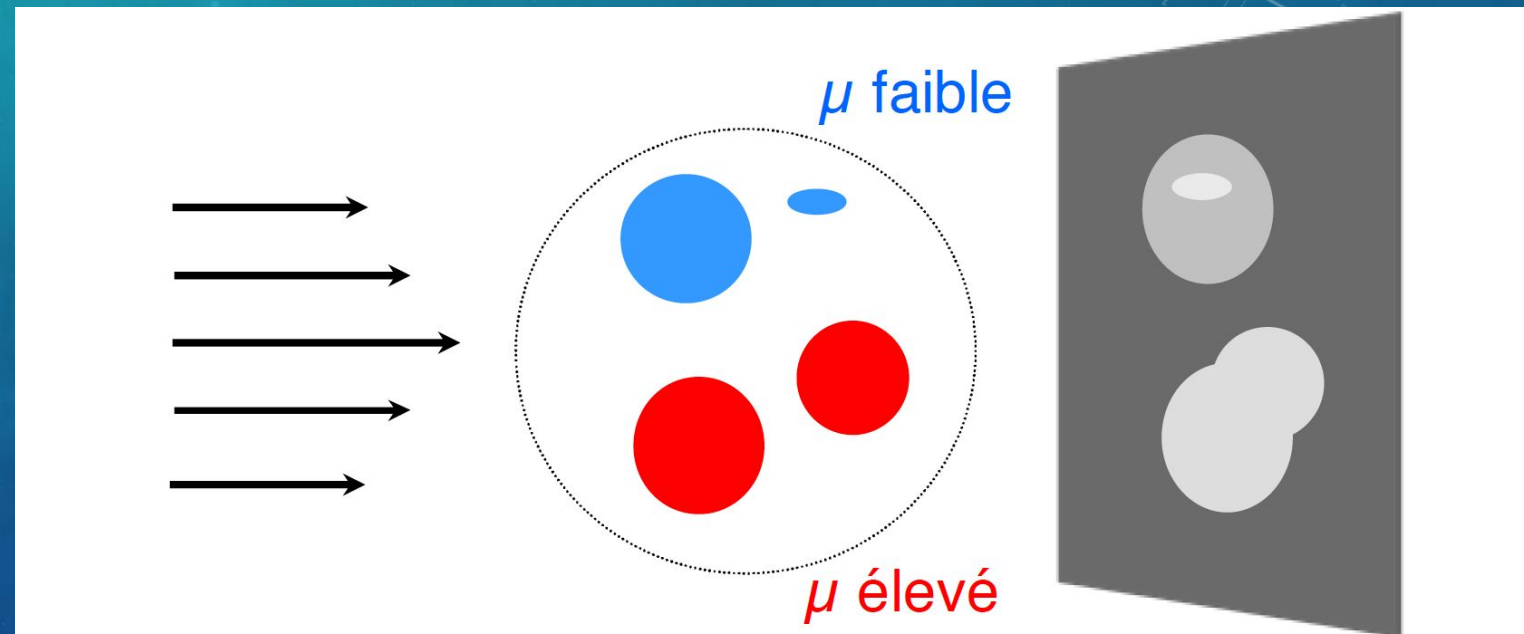
#### 3. TRAITEMENT DE L'IMAGE RADIANTE

#### LES MODIFICATEURS DU CONTRASTE



#### Diminuer le $\mu$ d'un milieu

- Air (poumon – digestif) remplace localement le tissu
- Clichés en inspiration-expiration, eau gazeuse...



### III. IMAGE RADIANTE

#### 3. TRAITEMENT DE L'IMAGE RADIANTE

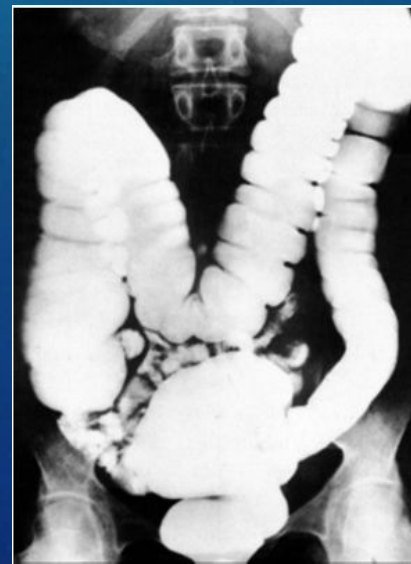
##### LES MODIFICATEURS DU CONTRASTE

##### Renforcer le $\mu$ d'un milieu

- sels de baryum (tube digestif) remplissent une cavité
- composés iodés (vaisseaux) se diluent dans le sang
- repères métalliques (clips et prothèse) implantés

##### Modification de l'épaisseur

La compression diminue l'épaisseur traversée et améliore aussi le contraste (moins de rayonnement diffusé): procubitus, ballonnet





### III. IMAGE RADIANTE

#### 3. TRAITEMENT DE L'IMAGE RADIANTE

LUTTE CONTRE LE RAYONNEMENT DIFFUSÉ EN ÉVITANT SA FORMATION

Diaphragme et localisateur

Compression

Diminuer la tension



### III. IMAGE RADIANTE

#### 3. TRAITEMENT DE L'IMAGE RADIANTE

LUTTE CONTRE LE RAYONNEMENT DIFFUSÉ

MOYEN ÉVITANT QUE LE DIFFUSÉ NE PARVIENNE SUR LE FILM



Technique de Broedel (air gap des anglosaxons): augmenter la distance sujet-film avec dans ce cas augmenter la distance foyer-sujet (télé thorax)

Grille anti diffusante (GAD) : malgré leur orientation les lames de plomb de la GAD arrêtent une partie de RT (30-40%) ce qui donne une image de trame gênante sur l'image; pour effacer cette image de trame sur la grille celle-ci est animée d'un mouvement oscillatoire perpendiculaire à l'axe des lames (c'est le principe de potter buckey)

**Indication de la grille anti diffusante:** Épaisseur totale traversée est supérieure à 10 cm et surface du faisceau dépasse 10 cm de côté et si la tension est  $> 70 \text{ Kv}$





### III. IMAGE RADIANTE

#### 3. TRAITEMENT DE L'IMAGE RADIANTE

LUTTE CONTRE LE RAYONNEMENT DIFFUSÉ

MOYEN ÉVITANT QUE LE DIFFUSÉ NE PARVienne SUR LA FILM

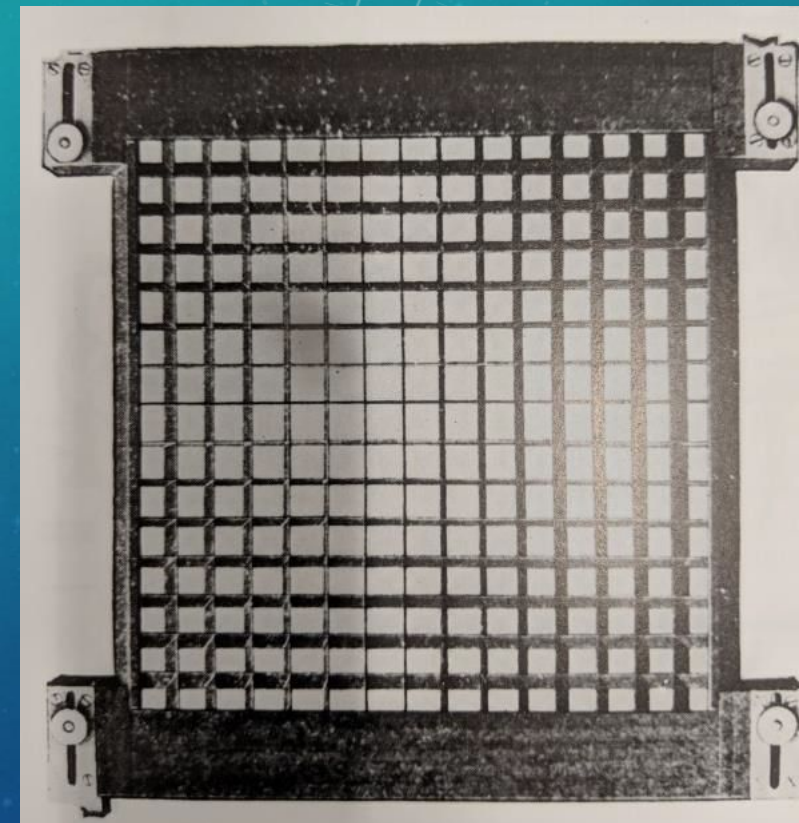
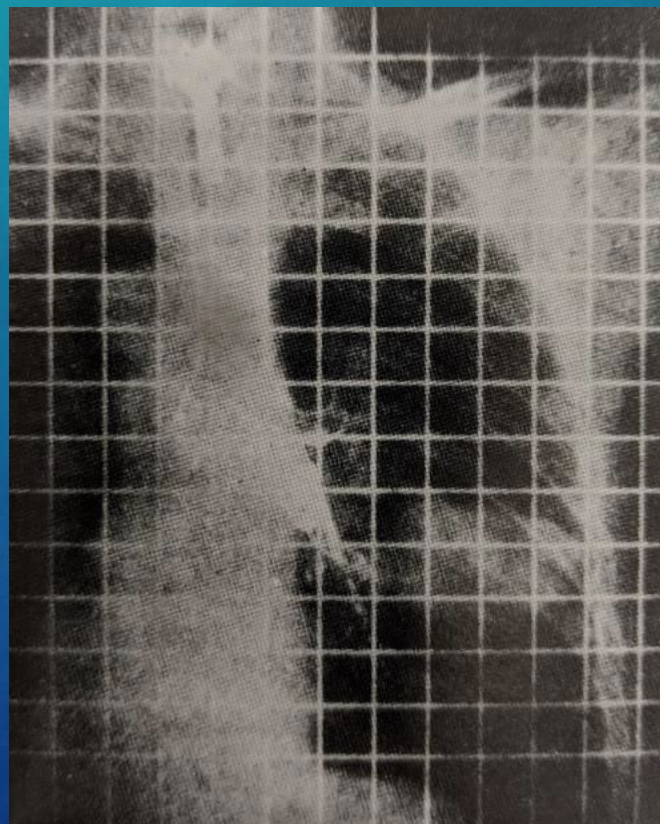
PRÉCAUTION D'UTILISATION DE LA GAD

#### Précautions d'utilisation:

Centrée et perpendiculaire au  
Rayon directeur

Bonne distance de focalisation

Nécessité d'augmenter les  
éléments ou milliamper  
seconde (mAs)



*aspect de la première grille  
anti-diffusion. radiographie  
avait un aspect moins voilé,  
mais la grille était visible  
sur le cliché*



### III. IMAGE RADIANTE

#### 3. TRAITEMENT DE L'IMAGE RADIANTE

##### LUTTE CONTRE LES FLOUS



- Diminution du flou géométrique:

Choix d'un petit foyer, diminution de la distance sujet-film, augmentation de la distance foyer-sujet

- Diminution du flou cinétique:

Apnée, immobilité (sac de sable, appuis sur statif), diminution du temps de pose

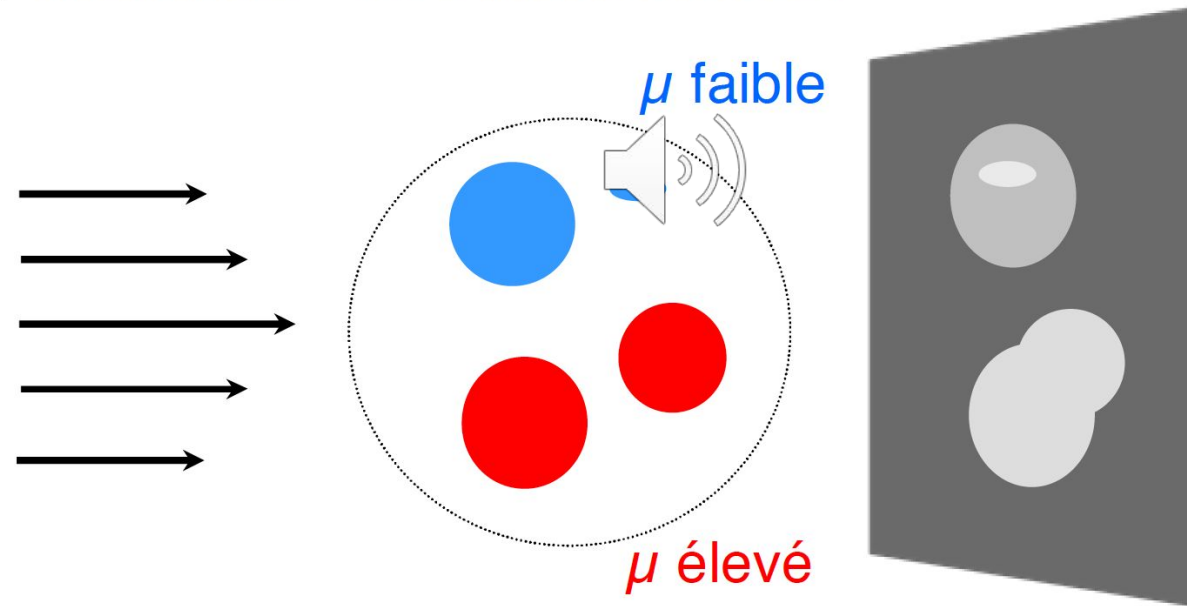
### III. IMAGE RADIANTE

#### 3. TRAITEMENT DE L'IMAGE RADIANTE

#### LUTTE CONTRE LA CONFUSION DES PLANS

### les superpositions

- "addition" de l'atténuation



- **Solutions :**
  - clichés de profils - positionnement du patient
  - compression (ballon...)

### III. IMAGE RADIANTE

#### 3. TRAITEMENT DE L'IMAGE RADIANTE

##### ACTION SUR LES PROJECTIONS CONIQUES



##### Téléradiographie:

Donne à la structure une image non agrandie ou agrandie de manière négligeable

Sujet placé contre le film à une grande distance du foyer (téléthorax 2 mètres, télérachis 1,5 mètres, télécrane 4 mètres)



## VI. TRANSFORMATION DE L'IMAGE RADIANTE EN IMAGE LUMINEUSE



Plusieurs détecteurs existent :

- Couple film écran de la radiographie conventionnelle
- Amplificateur de luminance dont l'image peut être filmée et numérisée
- Plaque à phosphorescence rémanente

## IV. TRANSFORMATION DE L'IMAGE RADIANTE EN IMAGE LUMINEUSE

### QUALITÉ DE L'IMAGE RADIOLOGIQUE



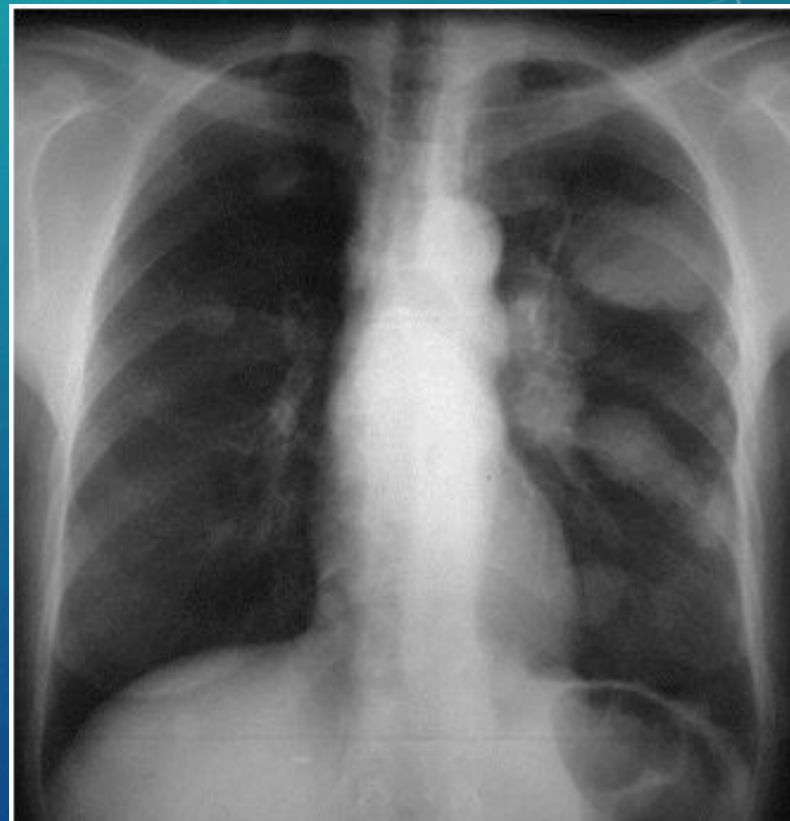
- **Résolution en contraste** : c'est l'aptitude à différencier deux plages de densité optique proche et surtout de différencier une structure contrastée du voile de fond ou bruit
- **Résolution spatiale** : c'est l'aptitude à différencier une structure de petite taille

# IV. TRANSFORMATION DE L'IMAGE RADIANTE EN IMAGE LUMINEUSE

## VOCABULAIRE



Télé thorax normal



Télé thorax pathologique



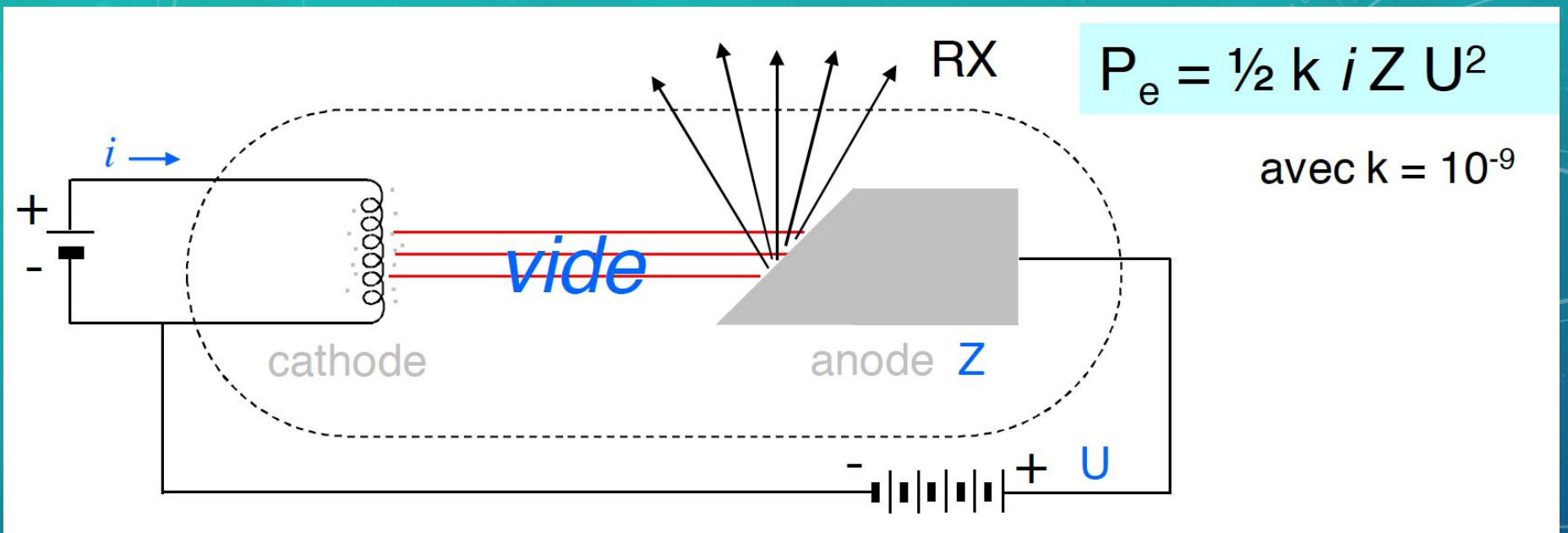


Image de l'atténuation d'un faisceau de rayons X par le tissu traversé

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x}$$

