

**Problème 1 (cours Evaluation E et reconstruction tomographique R)**  
**Comparaison de deux techniques de reconstruction tomographique (courbe ROC)**

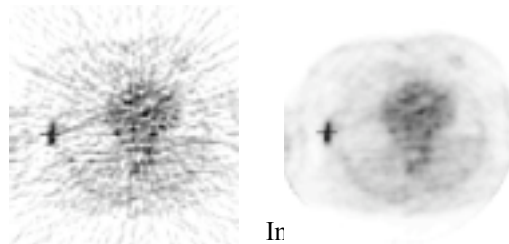
Un médecin nucléaire décide de réaliser une étude pour déterminer objectivement l'influence de la méthode de reconstruction tomographique mise en œuvre sur l'interprétation d'images tomographiques PET FDG reconstruites. A cet effet, il rassemble 20 examens corps entier au FDG, et reconstruit les images successivement par deux méthodes : rétroprojection filtrée (FBP) et OSEM . Il se focalise sur une coupe particulière pour chaque examen et obtient donc 40 images (20 images reconstruites par rétroprojection filtrée et 20 images reconstruites par OSEM). Il demande à un collègue de déterminer, pour chaque image, si elle contient ou non une tumeur en formulant son jugement sur l'échelle suivante :

1. très certainement non
2. probablement non
3. je ne sais pas
4. probablement oui
5. très certainement oui

Pour chaque patient, il a la chance de savoir si la coupe considérée contient ou non une tumeur. Il résume donc les résultats de la lecture de son collègue dans le tableau suivant, dans lequel tumeur + indique la présence d'une tumeur, tandis que tumeur - indique l'absence de tumeur :

Image	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Tumeur	+	+	-	-	-	+	-	+	+	-	-	+	-	+	+	+	-	+	-	-
Score FBP	4	2	3	3	2	3	1	4	4	2	3	5	4	2	1	4	1	5	3	2
Score OSEM	4	3	2	1	2	3	1	4	5	2	3	5	3	3	2	4	1	5	2	2

1. Voici un exemple d'images obtenues, l'une reconstruite par rétroprojection filtrée, l'autre obtenue par OSEM :



Quelle est l'orientation anatomique de ces coupes ? Justifier.

Il s'agit de coupes transaxiales. Puisque l'on voit apparaître clairement les contours du thorax dans cette direction.

2. De ces deux images, pouvez-vous dire laquelle a été reconstruite par rétroprojection filtrée et laquelle a été reconstruite par OSEM ? Préciser les éléments qui vous ont conduit à cette interprétation.

Gauche : rétroprojection filtrée (présence des artefacts de raies)

Droite : OSEM (pas d'artefacts de raies, activité nulle en dehors du patient)

3. Si on considère que toutes les images pour lesquelles un score supérieur ou égal à 3 a été attribué sont positives, quelles sont, pour FBP et OSEM :

- a) la probabilité pour qu'un patient diagnostiqué positif présente effectivement une lésion ?

probabilité(P+ quand T+) = VPP = VP / (VP+FP), P pathologie, T valeur du test

= 7/(7+5) = 58% pour FBP

= 9/(9+2) = 82% pour OSEM

- b) la valeur prédictive positive ?

58% pour FBP

82% pour OSEM

- c) la sensibilité de détection ?

sensibilité = VP / (VP+FN)

= 7/(7+3) = 70% pour FBP

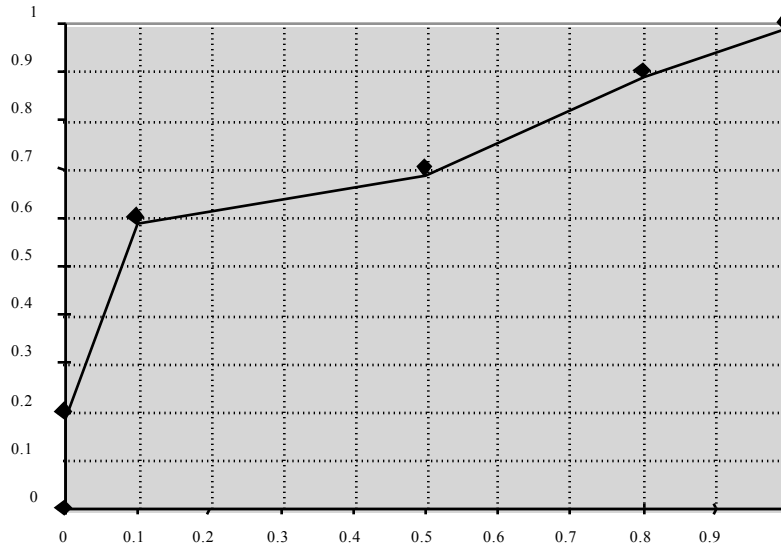
= 9/(9+1) = 90% pour OSEM

- d) la probabilité pour qu'un patient ne présentant pas de tumeur ait un examen interprété comme négatif ?

probabilité(T- quand P-) = spécificité = VN / (VN+FP)

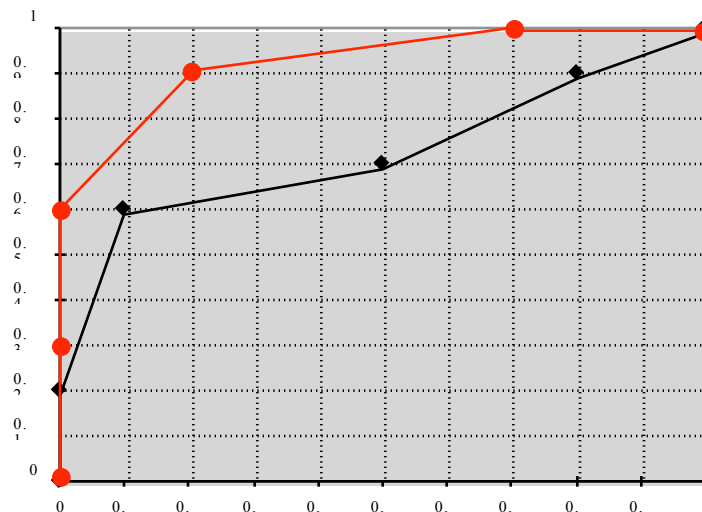
$= 5/(5+5)=50\%$  pour FBP  
 $= 8/(8+2)=80\%$  pour OSEM

4. Le graphe suivant représente la courbe ROC obtenue pour la méthode FBP. Sur ce même graphe, tracer la courbe ROC correspondant à la méthode OSEM.



Les points composant la courbe ROC correspondant à MLEM ont pour coordonnées :

- Seuil 0,5 point (1 ; 1)
- Seuil 1,5 point (0,7 ; 1)
- Seuil 2,5 point (0,2 ; 0,9)
- Seuil 3,5 point (0 ; 0,6)
- Seuil 4,5 point (0 ; 0,3)
- Seuil 5,5 point (0 ; 0)



5. Qualitativement, une des deux méthodes apparaît-elle plus performante que l'autre ? Justifier.

La méthode OSEM apparaît meilleure sachant que la courbe ROC qui lui est associée est "au dessus" (plus proche du point de coordonnées (0,1) par lequel passerait la courbe idéale) que la courbe ROC associée à FBP.

6. Sachant que l'aire sous la courbe ROC pour la méthode FBP est égale à 0,73 (erreur standard = 0,115), pouvez-vous déterminer si, quantitativement, les deux méthodes conduisent à des performances de détection

significativement différentes, sachant que l'erreur standard associée à l'aire sous la courbe ROC relative à OSEM vaut 0,064 ? Pour  $\alpha=5\%$ , la valeur de z critique est de 1,96.

L'aire sous la courbe ROC pour la méthode OSEM vaut : 0,925 (erreur standard = 0,064).

$H_0$  : les performances de détection ne sont pas significativement différentes pour les 2 méthodes.

Si on néglige l'appariement des deux courbes ROC, on a  $z = (0,925-0,73)/\sqrt{0,115^2+0,064^2}=1,48$ .

D'après une table de loi de z, on conclut donc que les deux courbes ne sont pas significativement différentes pour  $\alpha=5\%$  (test bilatéral), puisque la valeur de z est inférieure à la valeur seuil de 1.96.

7. Comment ce médecin nucléaire peut-il modifier son protocole d'évaluation pour aboutir à des résultats plus concluants ? Justifier.

- augmenter la taille de la base de données.
- effectuer un test de comparaison apparié.
- faire lire la base d'images par davantage d'observateurs.
- modifier l'échelle des scores

## **Problème 2 (cours Quantification en PET)**

Un patient est soumis à deux examens PET, à deux mois d'intervalle, dans le cadre du suivi thérapeutique d'une tumeur hépatique de petite taille inconnue (tumeur non visible au moyen d'autres modalités d'imagerie). La concentration d'activité dans la tumeur est mesurée en traçant une région d'intérêt interne à la tumeur sur la coupe sur laquelle la tumeur est la mieux visible. La région d'intérêt utilisée a la même taille pour les deux examens. On note une diminution significative du nombre de coups mesurés dans cette région d'intérêt sur l'image correspondant au deuxième examen, par rapport au nombre de coups mesurés sur l'image correspondant au premier examen. Pourtant, un prélèvement révèle que l'activité métabolique de la tumeur est strictement identique lors du deuxième examen par rapport à l'activité métabolique mesurée à la date du premier examen.

- Sachant que les deux examens ont été réalisés exactement dans les mêmes conditions (injection de la même dose traceuse, utilisation du même détecteur calibré strictement de la même façon), comment expliquer la décroissance apparente de l'activité métabolique de la tumeur sur les images PET ?

La décroissance apparente de l'activité métabolique est causée par une diminution du volume de la tumeur. Si le volume de la tumeur a diminué sans que l'activité métabolique n'est changée, l'effet de volume partiel introduit une sous-estimation de l'activité plus grande (la sous-estimation de l'activité étant d'autant plus grande que l'objet hyperfixant est petit par rapport à la résolution spatiale dans les images reconstruites).

**Problème 3 (cours Analyse de séquences d'images)**

Traitement de séquences d'images

En imagerie SPECT, on dispose de la séquence de 6 images temporelles, reconstruites par OSEM 4 sous-ensembles et 8 itérations, schématisée ci-dessous :

1	0.5	0.5	0	0
1	0.5	0.5	0	0
1	0.5	0.5	0.5	0.5
1.5	1	0.5	0.5	0.5
1.5	1.5	1	1	1

Image 1 : [0-30s]

10	6	7	3	4
10	6	7	3	3
10	6	7	7	7
15	10	6	6	6
15	15	10	10	10

Image 2 : [30-60s]

2	3	5	6	8
2	3	5	6	6
2	3	5	5	5
3	2	3	3	3
3	3	2	2	2

Image 3 : [1-2 min]

1	3	5.5	7.5	10
1	3	5.5	7.5	7.5
1	3	5.5	5.5	5.5
1.5	1	3	3	3
1.5	1.5	1	1	1

Image 4 : [2-4 min]

0	3	6	9	12
0	3	6	9	9
0	3	6	6	6
0	0	3	3	3
0	0	0	0	0

Image 5 : [4-8 min]

0	3	6	9	12
0	3	6	9	9
0	3	6	6	6
0	0	3	3	3
0	0	0	0	0

Image 6 : [8-12 min]

1. Combien de cinétiques différentes observe-t-on à partir de cette série d'images ?

Six cinétiques

- 1 - 10 - 2 - 1 - 0 - 0
- 0.5 - 6 - 3 - 3 - 3 - 3
- 0 - 4 - 8 - 10 - 12 - 12
- 0.5 - 7 - 5 - 5.5 - 6 - 6
- 0 - 3 - 6 - 7.5 - 9 - 9
- 1.5 - 15 - 3 - 1.5 - 0 - 0

2. On s'attend à ce que cette séquence d'images contienne une tumeur accumulant le radiotracer et une fonction d'entrée artérielle. Quelle image doit-on considérer pour tracer une région d'intérêt (ROI) autour de la tumeur ? Justifier.

La dernière image, puisque l'accumulation du traceur sera d'autant plus grande que l'on considère un temps tardif.

3. Quelle image doit-on considérer pour tracer une ROI correspondant à une artère ? Justifier.

La deuxième image, puisque le signal artériel est le premier signal perceptible dans une série d'images après administration du traceur. Cette deuxième image montre clairement des hyperintensités révélatrices du pic artériel.

4. Déterminer la cinétique moyenne associée à la tumeur en considérant une ROI carrée de taille 2 pixels x 2 pixels (4 pixels au total) dans laquelle le signal tumoral est maximum.

C'est dans l'image 6 que l'on tracera la ROI sur la région tumorale :

0	3	6	9	12
0	3	6	9	9
0	3	6	6	6
0	0	3	3	3
0	0	0	0	0

La cinétique correspondante sera :

0 - 13/4 - 26/4 - 32.5/4 - 39/4 - 39/4

5. Déterminer la cinétique moyenne associée à la fonction d'entrée artérielle en considérant une ROI carrée de taille 2 pixels x 2 pixels (4 pixels au total) dans laquelle le signal artériel est maximum.

C'est dans l'image 2 que l'on tracera la ROI sur la région artérielle :

10	6	7	3	4
10	6	7	3	3
10	6	7	7	7
15	10	6	6	6
15	15	10	10	10

La cinétique correspondante sera :

5.5/4 - 55/4 - 11/4 - 5.5/4 - 0 - 0

6. Dessiner l'image paramétrique « Time-to-peak » (temps d'apparition du max). Préciser l'unité dans laquelle sont exprimées les valeurs indiquées dans chaque pixel.

En unités images :

2	2	2	5	5
2	2	2	5	5
2	2	2	2	2
2	2	2	2	2
2	2	2	2	2

En unités minutes :

0.5	0.5	0.5	4	4
0.5	0.5	0.5	4	4
0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

7. On réalise une analyse factorielle à 2 facteurs de cette série d'images :

Le facteur 1 vaut (1.5 ; 15 ; 3 ; 1.5 ; 0 ; 0).

Le facteur 2 vaut (0 ; 4 ; 8 ; 10 ; 12 ; 12 )

Quel est le facteur artériel ? Justifier.

C'est le facteur 1, qui montre l'arrivée précoce du traceur.

8. Une des deux images factorielles est la suivante : est-ce l'image factorielle associée au facteur 1 ou au facteur 2 ?

2/3	1/3	1/3	0	0
2/3	1/3	1/3	0	0
2/3	1/3	1/3	1/3	1/3
1	2/3	1/3	1/3	1/3
1	1	2/3	2/3	2/3

Au facteur 1, puisque c'est la région artérielle qui est en hyper intensité.

9. Calculer et représenter l'image factorielle associée à l'autre facteur.

0	1/4	1/2	3/4	1
0	1/4	1/2	3/4	3/4
0	1/4	1/2	1/2	1/2
0	0	1/4	1/4	1/4
0	0	0	0	0

10. Si les images sont reconstruites avec OSEM 4 sous-ensembles et 4 itérations, les images factorielles contiendront-elles plus ou moins de valeurs nulles que les images factorielles présentées en questions 8 et 9 ? Justifier.

Si les images sont reconstruites avec moins d'itérations pour le même nombre de sous-ensembles, elles auront une moins bonne résolution spatiale. Par conséquent, elles contiendront moins de valeurs nulles que les images présentées en questions 8 et 9 car les différentes régions fonctionnelles seront plus « épatées » et se contamineront davantage.

#### **Problème 4 (cours Quantification en SPECT)**

##### Quantification en SPECT

- 1) Donner un type d'examen SPECT utilisant un radiotracer marqué avec un isotope de l'Iode et préciser l'isotope utilisé.  
Examens thyroïdiens (I123), examens des récepteurs dopaminergiques cérébraux (I123).
- 2) Citer deux éléments à modifier dans le protocole d'acquisition suivant que l'on fait de l'imagerie à l'Iode 123 (159 keV) ou de l'imagerie à l'Iode 131 (principale raie d'émission à 365 keV).  
La fenêtre d'acquisition et le collimateur.
- 3) Indiquer un élément expliquant que les images obtenues avec de l'I123 sont a priori globalement de meilleure qualité que les images obtenues avec de l'I131.  
Energie inférieure, donc mieux adaptée au cristal NaI(Tl), qui arrêtera plus de rayonnement (meilleure sensibilité, moins de diffusé dans le cristal).
- 4) Indiquer pour lequel des deux isotopes (I123 ou I131) le phénomène d'atténuation sera le plus pénalisant. Justifier.  
I123 car l'énergie est inférieure, donc le rayonnement plus atténué.
- 5) Pour corriger de l'atténuation les images acquises au moyen du traceur marqué à l'I123, on effectue, simultanément à l'acquisition en émission, une acquisition en transmission au moyen de Gd153 (énergie d'émission = 100 keV). Dire si les coefficients d'atténuation  $\mu$  ainsi mesurés vont avoir tendance à être plutôt surestimés ou plutôt sous-estimés, par rapport aux valeurs réelles qu'ils devraient avoir à 100 keV. Expliquer pourquoi.  
Sous estimés, car les données acquises dans la fenêtre du Gd153 contiendront des photons diffusés émanant de l'I123 : on aura l'impression qu'on détecte plus d'événements que ce qu'on détecterait sans avoir simultanément émission d'I123.
- 6) Indiquer comment il serait possible de réduire les erreurs commises sur la mesure des coefficients d'atténuation à 100 keV.  
Faire l'acquisition en transmission AVANT l'administration d'I123.
- 7) À partir de la mesure en transmission effectuée à l'aide du Gd153, on détermine les coefficients d'atténuation adaptés aux acquisitions à l'I123 et aux acquisitions à l'I131. Dans lequel de ces deux cas les coefficients d'atténuation estimés seront-ils les moins biaisés (c'est-à-dire les plus justes) ? Justifier.  
Dans le cas de l'I123, car l'extrapolation des coefficients mesurés à 100 keV se fera à une énergie plus proche que dans le cas de l'I131 (donc moins d'erreurs d'extrapolation).
- 8) Indiquer une raison pour laquelle il serait avantageux de faire une acquisition en transmission en utilisant du Tc99m plutôt que du Gd153 comme source de transmission, pour corriger des données I123 de l'atténuation.  
Moins d'erreurs d'extrapolation des coefficients d'atténuation d'une énergie à l'autre, car les énergies du Tc99m et de l'I123 sont proches.
- 9) Indiquer une raison pour laquelle il serait pénalisant de faire une acquisition en transmission en utilisant du Tc99m plutôt que du Gd153 comme source de transmission, pour corriger des données I123 de l'atténuation.  
Les fenêtres spectrométriques d'acquisition se recouvrent : forte contamination des données entre elles.



### **Problème 5 (cours Quantification en SPECT)**

#### Quantification en SPECT

On cherche à optimiser les paramètres d'une acquisition SPECT myocardique.

1. Dans le cas d'une acquisition au Tc99m, doit-on acquérir les données dans une fenêtre spectrométrique de 126-154 keV ou dans une fenêtre 135-163 keV pour minimiser les problèmes de diffusion ?

135-163 keV.

2. Pour minimiser les distorsions dans les images reconstruites en utilisant une orbite de rotation circulaire, doit-on acquérir les images en positionnant le patient de sorte que son cœur soit au plus près du centre de rotation du détecteur, ou plutôt excentré pour être proche de la tête de détection pour un sous-ensemble des projections ?

Proche du centre, car les distorsions sont réduites si le myocarde est vu avec avec à peu près la même résolution spatiale dans toutes les images de projection.

3. Pour optimiser la résolution spatiale, doit-on utiliser une orbite circulaire de 30 cm de rayon ou une orbite circulaire de 40 cm de rayon ?

30 cm, car la résolution spatiale se dégrade avec la distance entre objet (ici le cœur) et collimateur.

4. Pour minimiser les problèmes d'atténuation, doit-on utiliser plutôt un traceur marqué au Tl201 ou un traceur marqué au Tc99m ?

Un traceur marqué au Tc99m, car l'énergie d'émission du Tc99m est plus élevée que celle du Tl201, donc les photons sont moins atténués.

5. On souhaite effectuer, simultanément à l'examen SPECT, une acquisition en transmission pour corriger de l'atténuation. Sachant que l'on dispose d'une source au Gd153 (énergie d'émission = 100 keV), doit-on plutôt faire l'acquisition au Tc99m ou au Tl201 pour éviter que l'acquisition en transmission ne perturbe les données en émission ?

Pour éviter que l'acquisition en transmission ne perturbe les données en émission, le marqueur doit avoir une énergie plus élevée que celle de la source en transmission. Il faut donc faire une acquisition au Tc99m.

6. Si on effectue une acquisition de 120 projections 64 x 64 sur 360° avec un champ de vue de 40 cm x 40 cm, combien de coupes transaxiales pourra-t-on reconstruire et quelle sera la distance entre les coupes ?

On reconstruira 64 coupes transaxiales, et la distance entre coupes sera de  $40/64 \text{ cm} = 6,25 \text{ mm}$ .

## **QCM : PET**

En PET, les coïncidences fortuites peuvent être corrigées (choisir une ou plusieurs réponses) :

1. sans introduire de biais
2. sans augmenter le bruit
3. en utilisant une fenêtre de coïncidence secondaire de durée différente de la fenêtre de coïncidence principale
4. en réduisant la longueur de la fenêtre de coïncidence
5. en réduisant l'activité dans le champ de vue

En PET, les coïncidences diffusées (choisir une ou plusieurs réponses) :

1. peuvent être soustraites a posteriori sans introduire d'erreurs dans les images
2. sont plus pénalisantes en mode 2D qu'en mode 3D
3. sont intégralement stoppées par les septa en mode 2D
4. sont d'autant plus nombreuses que la fenêtre de coïncidences a une longue durée
5. sont plus pénalisantes en présence d'activité en dehors du champ de vue