

## Sélection ; Tolérance

### I. Problème n°1 du sujet d'examen de juin 1997

1) Les souris de la lignée **C57BL/6 (B6)** sont d'haplotype CMH H-2<sup>b</sup> et sont I-E<sup>-</sup> à cause d'un défaut dans le gène I-E $\alpha$  qui n'est pas exprimé dans cette lignée de souris. A partir de la lignée B6, on construit deux lignées de souris transgéniques : la lignée **B6.E $\alpha^d$**  exprime le transgène I-E $\alpha^d$  sous le contrôle d'un élément du promoteur des molécules du CMH de classe II ; la lignée **B6.CD11cE $\alpha^d$**  exprime le transgène I-E $\alpha^d$  sous le contrôle du promoteur de la molécule CD11c qui s'exprime normalement dans toutes les cellules dendritiques chez la souris. A l'aide d'anticorps anti-CD11c et anti-I-E<sup>d</sup> couplés à des fluorochromes, on réalise un marquage sur des coupes de thymus de ces différentes souris. Les résultats de ces marquages vous sont présentés dans les **Tableau 1** et **Tableau 2**.

|                       | souris<br>C57BL/6 | souris<br>B6E $\alpha^d$ | souris<br>B6CD11cE $\alpha^d$ |
|-----------------------|-------------------|--------------------------|-------------------------------|
| <b>cortex:</b>        |                   |                          |                               |
| - $\phi$ épithéliales | -                 | -                        | -                             |
| <b>médulla:</b>       |                   |                          |                               |
| - $\phi$ épithéliales | -                 | -                        | -                             |
| - $\phi$ dendritiques | +                 | +                        | +                             |

Tableau 1 : Marquage des coupes de thymus avec anti-CD11c

|                       | souris<br>C57BL/6 | souris<br>B6E $\alpha^d$ | souris<br>B6CD11cE $\alpha^d$ |
|-----------------------|-------------------|--------------------------|-------------------------------|
| <b>cortex:</b>        |                   |                          |                               |
| - $\phi$ épithéliales | -                 | +                        | -                             |
| <b>médulla:</b>       |                   |                          |                               |
| - $\phi$ épithéliales | -                 | +                        | -                             |
| - $\phi$ dendritiques | -                 | +                        | +                             |

Tableau 2 : Marquage des coupes de thymus avec anti-I-E

**Question 1.** Quelles sont les molécules de classe II du CMH exprimées dans ces différentes souris ? Commentez ces résultats.

2) Dans certaines lignées de souris qui expriment la molécule I-E, les cellules T qui utilisent les segments V $\beta$ 5 ou V $\beta$ 11 pour produire leur chaîne  $\beta$  de TCR sont éliminées dans le thymus ; ceci correspond à un phénomène de sélection négative. On analyse les cellules spléniques des différentes souris avec des anticorps anti-V $\beta$ 5, anti-V $\beta$ 11, anti-CD4 et anti-CD8 couplés à des fluorochromes. Les résultats de ces marquages vous sont présentés dans le **Tableau 3**.

|                                                  | souris<br>C57BL/6 | souris<br>B6E $\alpha^d$ | souris<br>B6CD11cE $\alpha^d$ |
|--------------------------------------------------|-------------------|--------------------------|-------------------------------|
| <b>Au sein de la population CD4<sup>+</sup>:</b> |                   |                          |                               |
| % de cellules V $\beta$ 5 <sup>+</sup>           | 4                 | 0,6                      | 0,7                           |
| % de cellules V $\beta$ 11 <sup>+</sup>          | 4                 | 0,2                      | 0,3                           |
| <b>Au sein de la population CD8<sup>+</sup>:</b> |                   |                          |                               |
| % de cellules V $\beta$ 5 <sup>+</sup>           | 15                | 1,1                      | 1,3                           |
| % de cellules V $\beta$ 11 <sup>+</sup>          | 6                 | 0,4                      | 0,7                           |

Tableau 3 : Pourcentage de cellules T spléniques exprimant V $\beta$ 5 et V $\beta$ 11 dans les souris C57BL/6, B6.E $\alpha^d$  et B6.CD11cE $\beta^d$ .

Question 2. A quoi l'élimination des cellules T V $\beta$ 5<sup>+</sup> et V $\beta$ 11<sup>+</sup> est-elle liée ?

Question 3. Expliquez ces résultats. Que pouvez-vous en conclure quant aux cellules capables de réaliser la sélection négative dans le thymus ?

3) Les souris C57BL/6, B6.E $\alpha^d$  et B6.CD11cE $\alpha^d$  ont été croisées avec des souris B6.I-A<sup>-/-</sup>. On obtient ainsi des souris B6.I-A<sup>-/-</sup>, B6.E $\alpha^d$  I-A<sup>-/-</sup> et B6.CD11cE $\alpha^d$  I-A<sup>-/-</sup> qui n'expriment pas la molécule du CMH de classe II I-A. On réalise une expérience de marquage en cytométrie de flux sur les splénocytes et les thymocytes de ces souris à l'aide d'anticorps anti-CD4 et anti-CD8 couplés à des fluorochromes. Les résultats sont présentés en **Figure 1**.

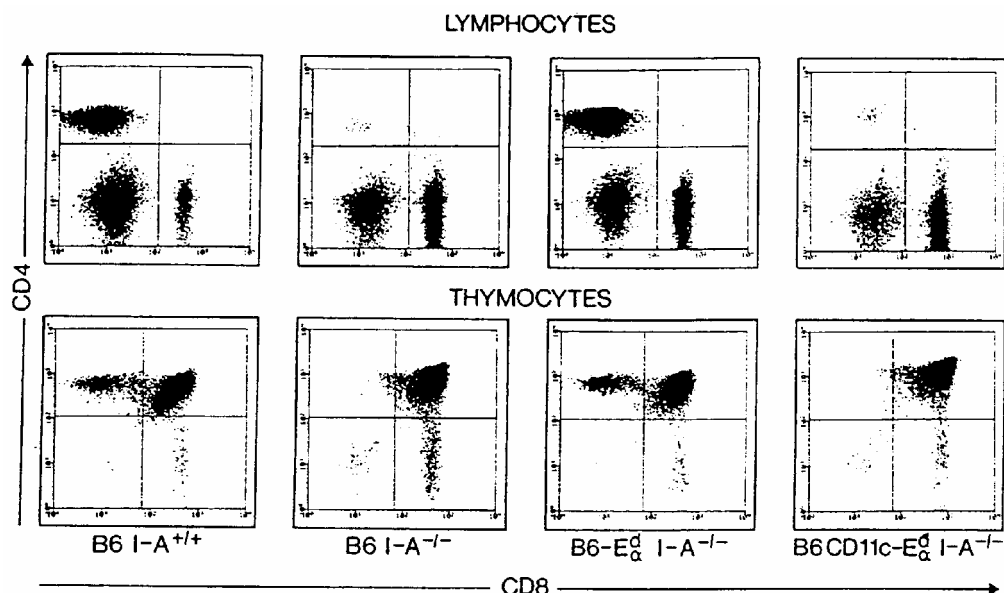


Figure 1 : Marquage des splénocytes et les thymocytes des souris C57BL/6 (B6), B6 I-A<sup>-/-</sup>, B6.E $\alpha^d$  I-A<sup>-/-</sup> et B6.CD11cE $\alpha^d$  I-A<sup>-/-</sup> avec anti-CD4 et anti-CD8.

Question 4. Analysez ces résultats en commentant l'influence des transgènes sur la proportion de cellules T  $CD4^+$  dans la rate et le thymus des différentes souris.

Question 5. Quelles informations concernant la sélection thymique pouvez-vous déduire de l'ensemble de ces expériences?

## II. Problème n°2 du sujet d'examen de juin 1997

1) On introduit dans des ovocytes fécondés de souris **C57BL/6** d'haplotype  $H-2^b$  deux transgènes contenant les gènes réarrangés codant respectivement pour la chaîne  $\alpha$  et la chaîne  $\beta$  du TcR d'un clone T spécifique du peptide 257-264 de l'ovalbumine (**pOVA 257-264**) présenté par  $H-2 K^b$ . Ce TcR utilise les segments de gènes  $V\alpha 2$  et  $V\beta 5$ . Les souris transgéniques ainsi obtenues sont croisées avec des souris de même haplotype, déficientes en  $\beta 2$  microglobuline ( $\beta 2m^{-/-}$ ). On obtient ainsi des souris **TcRtg  $\beta 2m^{+/-}$**  et des souris **TcRtg  $\beta 2m^{-/-}$** . On réalise une expérience de marquage en cytométrie de flux avec des anticorps anti-CD4, anti-CD8, anti- $V\alpha 2$  et anti- $V\beta 5$  couplés à des fluorochromes sur les thymocytes des différentes souris non transgéniques et transgéniques. Le résultat de cette expérience vous est présenté sur la **Figure 2** :

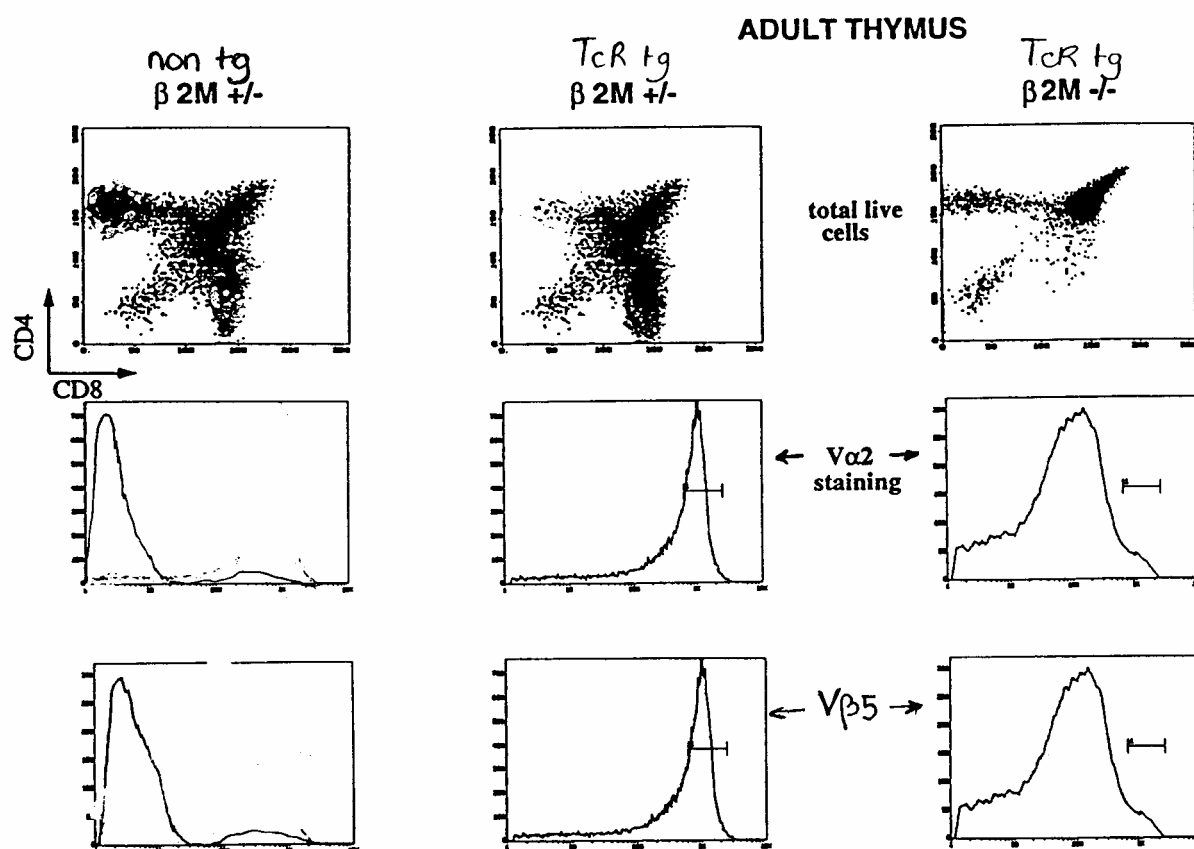


Figure 2 : Marquage des thymocytes de souris non transgéniques  $\beta 2m^{+/-}$  (non tg), TcRtg  $\beta 2m^{+/-}$  et TcRtg  $\beta 2m^{-/-}$  avec des anticorps anti-CD4, anti-CD8, anti- $V\alpha 2$  et anti- $V\beta 5$ .

Question 1. Analysez ces résultats en comparant et en expliquant les proportions de cellules simple-positives  $CD8^+$  dans les thymus des différentes souris.

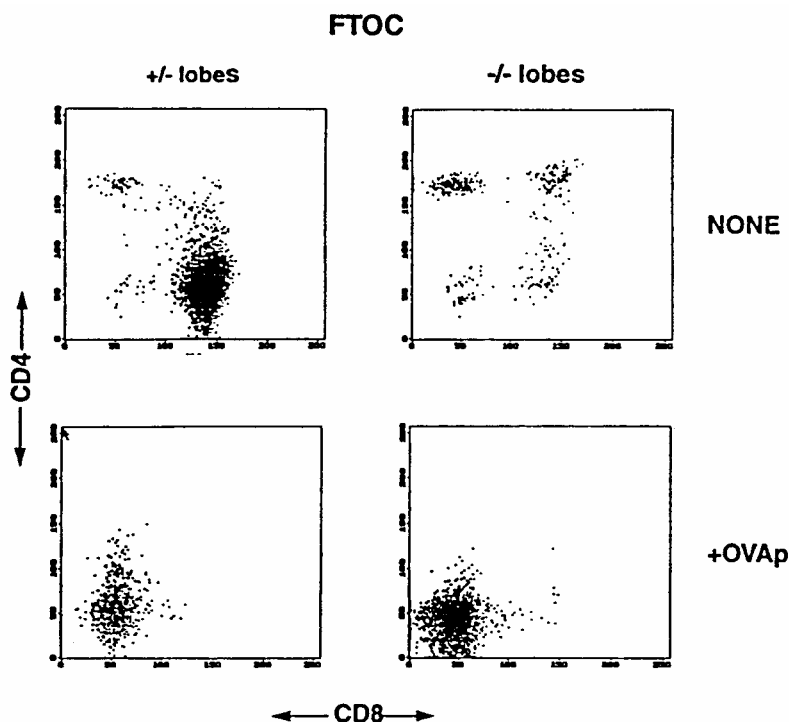
2) On peut cultiver *in vitro* des lobes thymiques fœtaux. Ces cultures organotypiques de thymus fœtal (FTOC) permettent d'observer et de manipuler *in vitro* la maturation et la sélection des thymocytes. On réalise des cultures organotypiques de lobes thymiques fœtaux de souris **TcRtg  $\beta 2m^{+/-}$**  et de souris **TcRtg  $\beta 2m^{-/-}$** , en ajoutant ou non à ces cultures le peptide pOVA. Après 7 jours de culture, les lobes sont récupérés et broyés pour en extraire les thymocytes. Un marquage en cytométrie de flux avec des anticorps anti-CD4, anti-CD8 est réalisé sur les thymocytes extraits de ces cultures organotypiques (**Figure 3**).

Les mêmes cultures sont réalisées en présence de concentrations différentes du peptide pOVA. On mesure les nombres de thymocytes  $CD4^{+}CD8^{+}$  récupérés à l'issue des 7 jours de culture en fixant arbitrairement à 1 les nombres de cellules observés dans les cultures en absence de peptide ajouté (**Figure 4**).

**Question 2.** Analysez l'ensemble de ces résultats. A quel processus est due la diminution du nombre de cellules DP ? Explicitez en particulier ce qui se produit dans les lobes **TcRtg  $\beta 2m^{-/-}$** .

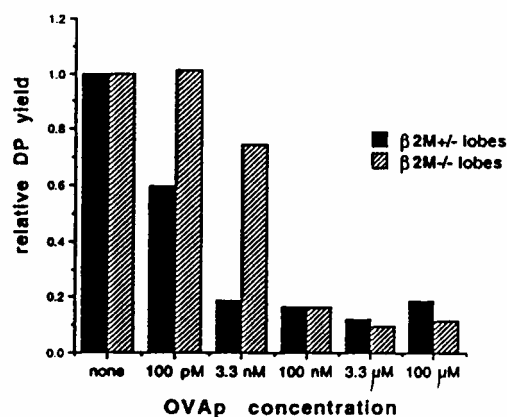
**Figure 3 :**

Marquage des thymocytes extraits des FTOC de souris **TcRtg  $\beta 2m^{+/-}$**  (+/- lobes) et de souris **TcRtg  $\beta 2m^{-/-}$**  (-/- lobes) avec des anticorps anti-CD4 et anti-CD8.



**Figure 4 :**

Nombre de cellules DP ( $CD4^{+}CD8^{+}$ ) dans les lobes thymiques de souris **TcRtg  $\beta 2m^{+/-}$**  ( $\beta 2m^{+/-}$  lobes) et de souris **TcRtg  $\beta 2m^{-/-}$**  ( $\beta 2m^{-/-}$  lobes) cultivés en présence de concentrations croissantes de pOVA.



3) On réalise des expériences similaires en ajoutant, au lieu de pOVA, aux cultures organotypiques, deux autres peptides tous deux capables de se fixer sur  $K^b$  avec la même affinité que le peptide pOVA :

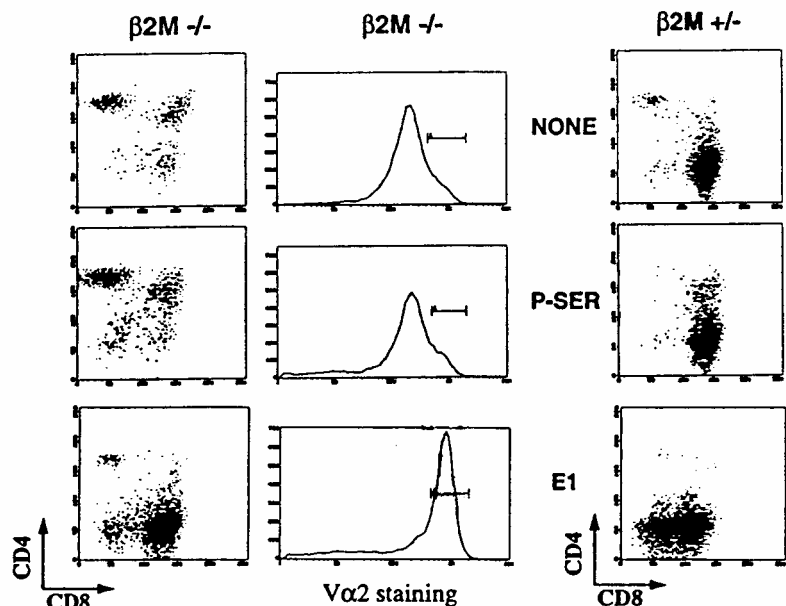
P-SER (S S Y S Y S S L) n'est jamais reconnu par le TcR transgénique.

E1 (E I I N F E K L) est un variant du peptide pOVA (S I I N F E K L).

Le résultat du marquage des thymocytes extraits des cultures organotypiques est montré à la **Figure 5** :

**Figure 5 :**

**Marquage des thymocytes extraits des FTOC de souris TcRtg  $\beta 2m^{+/-}$  ( $\beta 2M^{+/-}$ ) et de souris TcRtg  $\beta 2m^{-/-}$  ( $\beta 2M^{-/-}$ ) cultivés en absence ou en présence de 20  $\mu M$  de P-SER ou E1 avec des anticorps anti-CD4, anti-CD8 et anti-V $\alpha 2$ .**

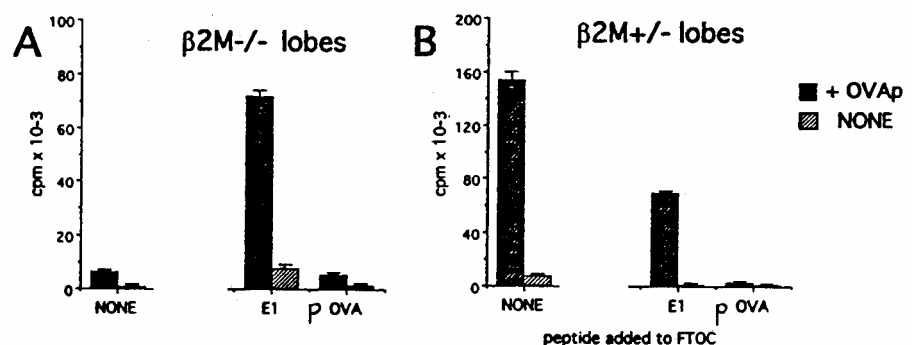


**Question 3.** Quels rôles jouent les peptides P-SER et E1 sur la sélection des cellules T exprimant le TcR transgénique dans les lobes des souris TcRtg  $\beta 2m^{+/-}$  et TcRtg  $\beta 2m^{-/-}$  ?

4) Les cellules extraites des cultures organotypiques sont mises en culture *in vitro* en présence de cellules EL4 (qui expriment  $K^b$ ) irradiées en absence (NONE) ou en présence de 10 nM du peptide pOVA (+ OVAp). Après 48h, on ajoute de la thymidine tritiée aux cultures et on évalue l'incorporation de thymidine tritiée 8 heures après. Les résultats sont présentés à la **Figure 6** :

**Figure 6 :**

**Réponse des thymocytes extraits des FTOC au peptide antigénique pOVA.**



**Question 4.** Que pouvez-vous en conclure sur les aptitudes fonctionnelles des cellules T extraites des différents types de FTOC, et pourquoi ?

5) A partir des souris TcRtg  $\beta 2m^{+}$ , on dérive un clone T cytotoxique spécifique du peptide pOVA présenté par H-2  $K^b$ . Ce clone T est mis en culture en présence de cellules EL4 préalablement

marquées au  $^{51}\text{Cr}$ , et des peptides pOVA, P-SER ou E1. La lyse des cellules EL4 est évaluée par mesure du  $^{51}\text{Cr}$  relargué dans le surnageant après 4 heures de culture. Le résultat de cette expérience est présenté en **Figure 7**.

Le même clone T est mis en culture en présence de cellules EL4 préalablement marquées au  $^{51}\text{Cr}$  et préalablement chargées avec 2 pM de pOVA, et les peptides P-SER ou E1. La **Figure 8** montre le pourcentage d'inhibition de la lyse des cellules EL4 chargées en pOVA par les différents peptides.

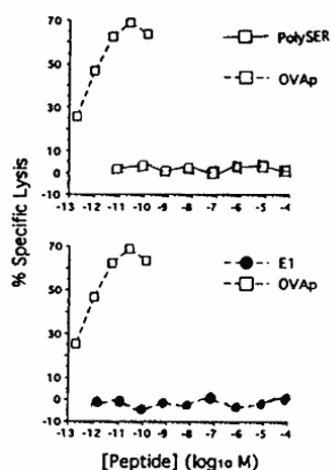


Figure 7

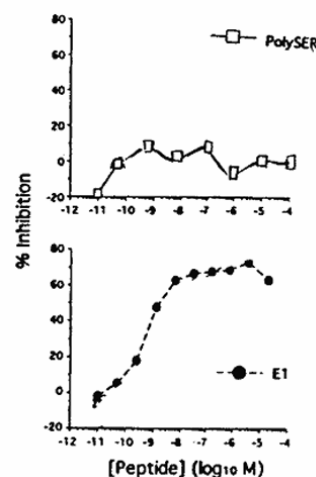


Figure 8

**Question 5.** Que peut-on en conclure sur les propriétés des peptides pOVA, P-SER et E1 ?

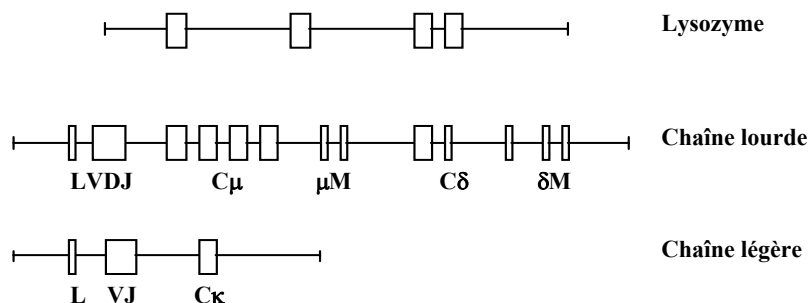
**Question 6.** Que suggère l'ensemble de ces résultats quant à la nature des peptides impliqués dans le processus de sélection positive dans le thymus ?

### III.

(D'après Goodnow, C.C., *et al.* (1998) *Nature* 334:676 ; Adams, E., *et al.* (1990) *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 87:5687).

Trois types de souris transgéniques sont obtenues avec les transgènes présentés sur la **Figure 9** :

Figure 9



Les souris Lys-Tg possèdent le transgène lysozyme qui s'exprime de façon ubiquitaire dès le stade embryonnaire. Les souris Ig-Tg possèdent les transgènes codant les chaînes lourde et légère d'un anticorps anti-lysozyme. Les souris double-transgéniques (Dbl-Tg) possèdent l'ensemble des transgènes.

La réponse contre le lysozyme est étudiée dans des souris Lys-Tg, dans les lignées C57BL/6 (B6) ou C57BL/6 x CBA. Les souris sont immunisées avec le lysozyme seul ou le lysozyme couplé à des

globules rouges de cheval (GRC). Après immunisation, le titre anticorps anti-lysozyme est déterminé ainsi que la capacité des lymphocytes ganglionnaires à proliférer en présence de cellules présentatrices d'antigène et de lysozyme (**Tableau 4**).

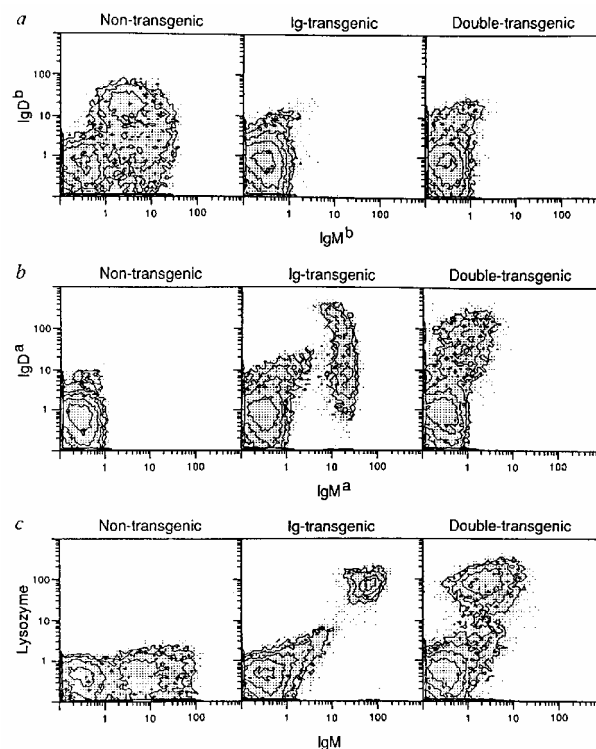
**Question 1.** Expliquer la différence de comportement entre les souris B6 et B6 x CBA ainsi que l'effet du transgène dans ces souris.

L'expression des transgènes d'immunoglobuline est étudiée dans les souris Ig-Tg ou DbI-Tg par immunofluorescence sachant que les transgènes proviennent d'un hybridome issu de BALB/c (Igh<sup>a</sup>) et que les souris B6 sont d'haplotype Igh<sup>b</sup>.

| Souris immunisées | Antigène immunisant | Titre anticorps en µg/ml | Incorporation thymidine (cpm) |
|-------------------|---------------------|--------------------------|-------------------------------|
| B6                | Lysozyme            | <1                       | 2 000                         |
|                   | Lysozyme-GRC        | 1 000                    | 4 000                         |
| B6 Lys-Tg         | Lysozyme            | <1                       | 2 200                         |
|                   | Lysozyme-GRC        | <1                       | 1 800                         |
| B6 x CBA          | Lysozyme            | 1 200                    | 40 000                        |
|                   | Lysozyme-GRC        | 1 500                    | 48 000                        |
| B6 x CBA Lys-Tg   | Lysozyme            | <1                       | 1 800                         |
|                   | Lysozyme-GRC        | <1                       | 1 900                         |

**Tableau 4**

**Figure 10**



**Question 2.** Analyser les résultats présentés sur la **Figure 10** qui illustre les analyses de fluorescence des cellules spléniques provenant de souris B6, transgéniques ou non.

La sécrétion spontanée d'IgM<sup>a</sup> ainsi que le nombre de plages de lyse anti-lysozyme sont évalués dans les souris Ig-Tg et DbI-Tg (**Tableau 5**).

| Souris    | IgM <sup>a</sup> (μg/ml) | Nombre de plages de lyse anti-lysozyme par rate |
|-----------|--------------------------|-------------------------------------------------|
| B6 Ig-Tg  | 40                       | 9 450                                           |
| B6 DbI-Tg | 2                        | <100                                            |

**Tableau 5**

**Question 3.** Ces résultats sont-ils en accord avec l'analyse d'immunofluorescence présentée à la Question 2 ? Expliquer.

Des expériences de transfert de cellules sont effectuées dans des souris receveurs B6 irradiés. 10<sup>5</sup> cellules spléniques de souris non-immunisées normales ou transgéniques sont transférées avec 5.10<sup>6</sup> cellules spléniques de souris B6 ayant été immunisées contre des globules rouges de cheval. Après immunisation avec du lysozyme-GRC, le titre sérique anti-lysozyme est déterminé dans les souris receveurs (**Tableau 6**).

| Cellules transférées     |                                                    | Antigène lysozyme-GRC | Titres anticorps anti-lysozyme |
|--------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| 10 <sup>5</sup> cellules | 5.10 <sup>6</sup> cellules "sensibilisées aux GRC" |                       |                                |
| B6                       | B6                                                 | -                     | <1                             |
| B6 Ig-Tg                 | B6                                                 | -                     | <1                             |
| B6 DbI-Tg                | B6                                                 | -                     | <1                             |
| B6                       | B6                                                 | +                     | <1                             |
| B6 Ig-Tg                 | B6                                                 | +                     | 40                             |
| B6 DbI-Tg                | B6                                                 | +                     | <1                             |

**Tableau 6**

**Question 4.** Quelle est la nature des cellules lymphocytaires impliquées dans la non-réponse au lysozyme des souris double-transgéniques ?