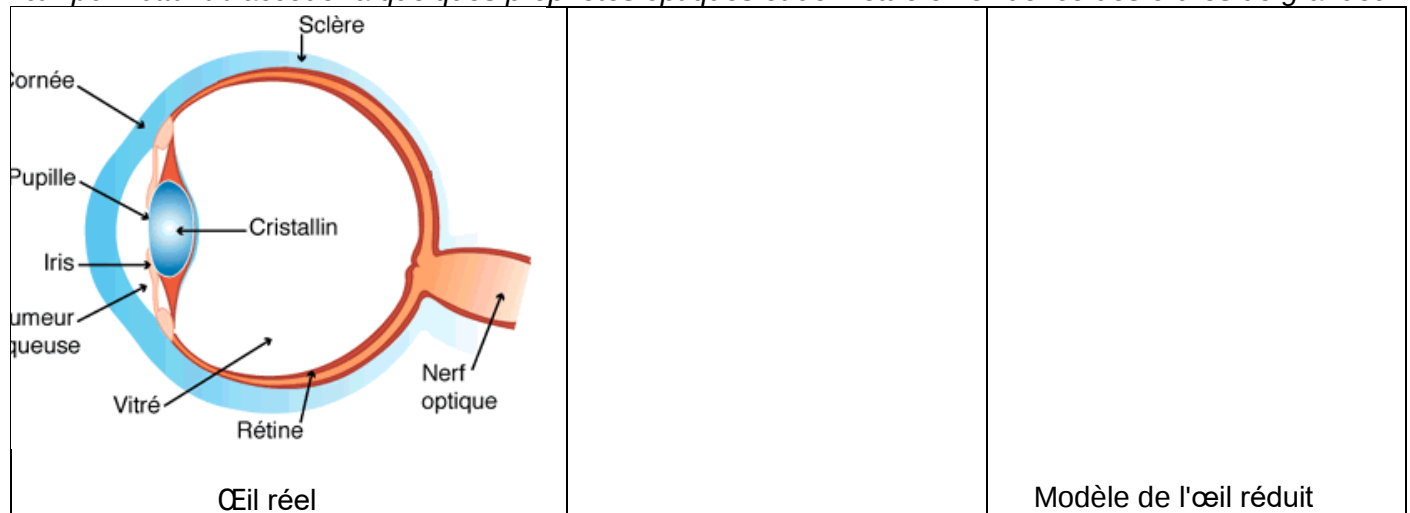


|    |                                                |       |
|----|------------------------------------------------|-------|
| O3 | Œil et appareil photographique numérique (APN) | MPSI2 |
|----|------------------------------------------------|-------|

## I. MODÉLISATION DE L'OEIL

### 1. Anatomie simplifiée et modèle réduit de l'œil

Nous n'entrons pas ici dans la physiologie de manière approfondie. Nous proposons un modèle simplifié de l'œil permettant d'accéder à quelques propriétés optiques et de mettre en évidence des ordres de grandeur.



**L'iris** (partie colorée) est percé de **la pupille** dont le diamètre  $D$  est variable (de 2 à 8 mm), et qui joue le rôle de..... : l'iris limite la puissance lumineuse pénétrant dans l'œil et permet ....

**Le cristallin** est modélisé par ..... (.....).  
Le cristallin peut se "bomber" plus ou moins sous l'action des muscles ciliaires, ce qui le rend plus ou moins convergent →  **$f'$  est variable**

**La rétine** est constituée de cellules sensibles à la lumière. On la modélise par un ..... situé à une distance  $d$  égale à environ 17 mm par rapport au cristallin →  **$d$  est fixe**

### 2. Accommodation

L'œil ne peut voir net que si l'image se forme sur la rétine !

1<sup>er</sup> cas Vision d'un objet à l'infini (l'œil est sans défaut  $\equiv$  emmétrope)

Un œil **emmétrope au repos** (sans accommodation, muscles ciliaires non contractés), voit nettement des objets à l'infini.  
→ le foyer image du cristallin au repos est .....

$$f' =$$

On appelle **Punctum remotum** (PR) le point objet sur l'axe optique conjugué du point de la rétine sur l'axe lorsque le cristallin est au repos (pas d'accommodation).

→ C'est donc le point le plus ..... que l'œil puisse voir.

→ La vergence du cristallin est .....

→ Pour un œil emmétrope, le PR est .....

## 2<sup>ème</sup> cas Vision d'un objet à distance finie

Lorsque l'objet se rapproche, l'œil doit s'adapter en modifiant la focale  $f'$  du cristallin (on dit que l'œil accommode, les muscles ciliaires se contractent).

→ le foyer image du cristallin .....

.....

$$f' <$$

On appelle **Punctum proximum** (PP) le point objet sur l'axe optique conjugué du point de la rétine sur l'axe lorsque le cristallin accommode au maximum.

→ C'est donc le point le plus ..... que l'œil puisse voir.

→ La vergence du cristallin est .....

→ Pour un œil emmétrope, le PP est à environ ..... (le PP s'éloigne avec l'âge → presbytie).

### Plage d'accommodation d'un œil normal :

La plage d'accommodation est l'ensemble des distance œil-objet permettant la formation d'une image sur la rétine.

→ La plage d'accommodation d'un œil normal est donc : ] ..... ; ..... ]

## 3. Quelques défauts de vision

Un œil normal est dit **emmétrope**.

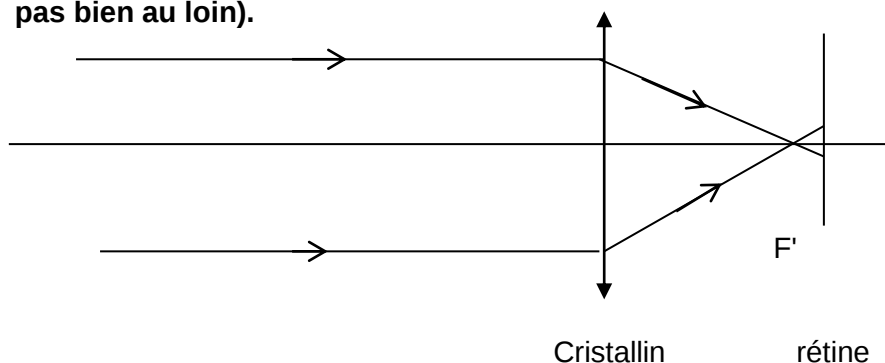
Un défaut de l'œil s'appelle une **amétropie**.

Citons les amétropies les plus courantes : myopie et hypermétropie, presbytie et astigmatisme.

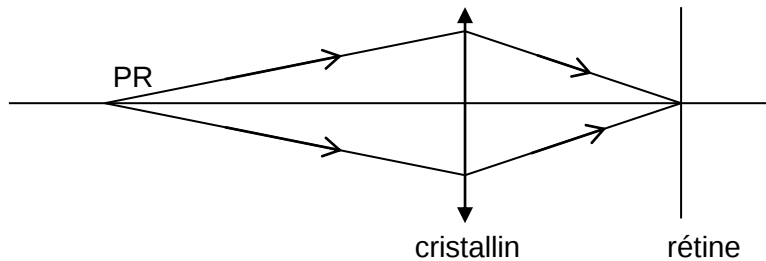
### a. L'œil myope

Il est la cause optique de la myopie.

L'œil myope même au repos est "trop convergent", aussi le plan focal est-il situé en avant de la rétine : **un objet à l'infini fournira une image en avant de la rétine qui sera donc vue floue (l'œil myope ne voit pas bien au loin).**



Le punctum remotum PR, point que l'œil au repos (sans accommodation) voit nettement, peut être relativement proche, parfois à une distance de l'ordre du mètre.



**Plage d'accommodation d'un œil myope :**

PP à 20 cm et PR à 1m (par exemple)

*Remarque* : On appelle *profondeur de champ d* la distance entre les objets les plus proches et les plus éloignés qui peuvent être vus nettement ( $d = d_{max} - d_{min}$ )

### **Correction de la myopie**

On corrige la myopie au moyen d'une lentille .....

### **b. L'œil hypermétrope**

**Il est la cause optique de l'hypermétropie.**

L'œil hypermétrope n'est, au contraire du précédent, **pas assez convergent**.

**Plage d'accommodation d'un œil hypermétrope :**

L'œil hypermétrope voit à une distance de 25 cm et jusqu'à l'infini (mais en accommodant tout le temps)  
→ En général, les hypermétropes finissent par avoir une fatigue de l'œil et ont besoin d'une correction, surtout s'ils utilisent beaucoup la vision de près (lecture, ordinateur...).

### **Correction de l'hypermétropie**

On corrige l'hypermétropie grâce à une lentille .....

### c. Autres défauts de l'œil

#### **L'œil astigmat**

L'œil astigmat présente un manque de symétrie de révolution autour de son axe optique ou encore il est un peu plus "bombé" qu'en général d'où le manque de stigmatisme.

#### **L'œil presbyte**

La presbytie est due à une moins bonne souplesse du cristallin apparaissant avec le vieillissement, d'où une moins bonne accommodation.

Pour un œil normal devenu presbyte, la position de PR ne change pas au cours de la vie, par contre l'amplitude d'accommodation  $A$  diminuant, la distance minimum de vision nette augmente.

La presbytie est donc une insuffisance de vergence rendant impossible la vision de près : on la corrige en utilisant un verre convergent.

*Notons que les défauts peuvent se cumuler : on peut être myope, astigmat et presbyte.*

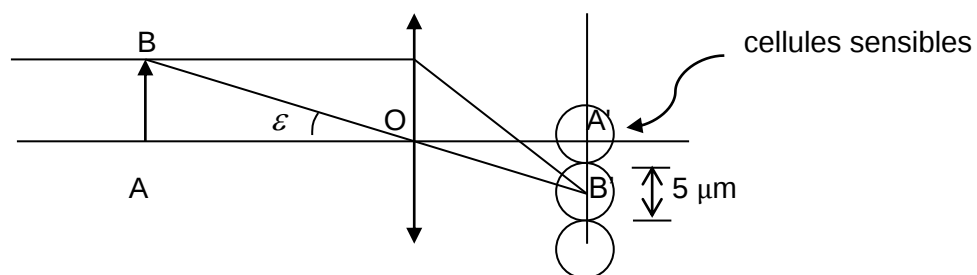
### **3. Limite de résolution angulaire (ou pouvoir séparateur de l'œil)**

Deux points  $A$  et  $B$  ne peuvent être séparés que si les images  $A'$  et  $B'$  de ces deux points se forment sur deux cellules sensibles différentes de la rétine.

La **limite de résolution angulaire** ou **pouvoir séparateur de l'œil** est l'angle minimum sous lequel il peut distinguer deux points. Il s'agit donc **d'un angle !!**

Le pouvoir séparateur correspond au cas limite où  $A'$  et  $B'$  sont séparés par au moins une cellule sensible. Les cellules sensibles ayant une dimension de l'ordre de  $5\text{ }\mu\text{m}$ , la distance entre  $O$  et la rétine étant d'environ  $d = 17\text{ mm}$  le pouvoir séparateur s'exprime par l'angle  $\varepsilon =$

Cette valeur est variable d'un œil à l'autre et dépend de la luminosité.

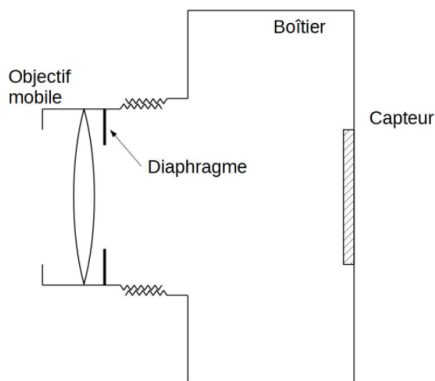


Exercice : À l'aide d'une mire, calculer l'ordre de grandeur du pouvoir séparateur de votre œil.

## II. MODÉLISATION DE L'APPAREIL PHOTO NUMERIQUE (APN)

### 1. Principe de fonctionnement

#### a. Modélisation



*Schéma simplifié d'un APN*

Un APN comprend :

- **Un objectif** : groupe de lentilles, qui donne d'un objet réel une image réelle, inversée, au niveau du capteur. Cette association permet de corriger les nombreux défauts (aberrations géométriques et chromatiques) que présente toute lentille. Nous modéliserons ce groupe de lentilles par **une lentille unique de distance focale  $f'$**
- **Un diaphragme**, qui limite l'ouverture du faisceau lumineux entrant
- **Un obturateur** : mécanisme intégré à l'appareil photo, qui permet de laisser entrer la lumière sur le capteur pendant une période donnée (non représenté ici).
- **Un capteur CCD** (numérique) qui enregistre l'image et la transforme en signal électrique.

Remarque : on modélise donc un APN de la même manière que l'on modélise un œil.

Différences essentielles :

**b. Mise au point de l'APN**

Le réglage de la **mise au point** permet que **l'image de l'objet photographié se forme sur le capteur**.  
Pour cela, on ajuste la distance  $d'$  entre l'objectif et le capteur.

Schéma :

| Objet à l'infini | Objet à distance finie |
|------------------|------------------------|
|                  |                        |

Lorsque l'on fait la mise au point à l'infini (pour former un image nette d'un objet très éloigné), la distance  $d'$  est égale à la distance focale de l'appareil.  
Quand on souhaite obtenir une image plus proche, on augmente la distance  $d'$ .

**b. Condition de netteté de l'image et profondeur de champ**

**Condition de netteté de l'image d'un objet ponctuel**

Soit A un objet ponctuel et A' son image.

Si le capteur se trouve un peu en amont ou un peu en aval du plan où se forme l'image A', il se formera une tache de dimension  $\delta$  sur le capteur CCD qui est formé de pixels de longueur caractéristique  $\epsilon$  (la taille d'un pixel est de l'ordre de quelques  $\mu\text{m}$ ).

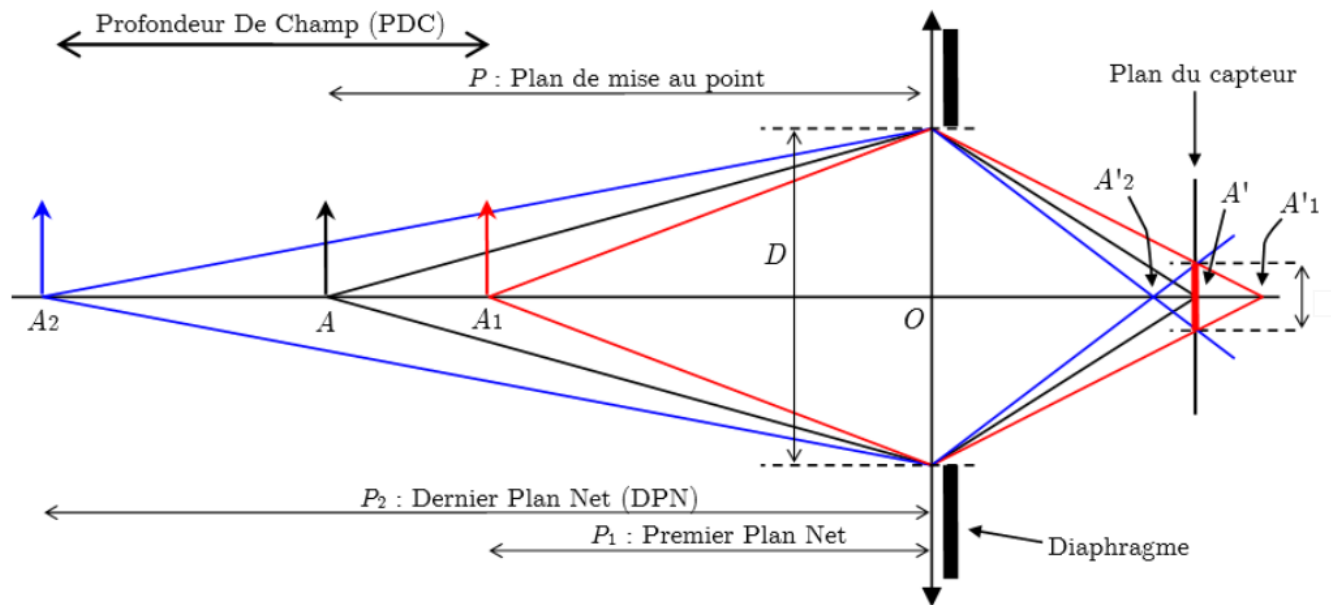
Tant que  $\delta < \epsilon$ , l'image de A sera nette sur la photo.

Schéma :

**Conséquence lorsque le capteur est fixe :**

Lorsque l'on a effectué une mise au point parfaite sur un objet A (**capteur fixe en A'**), on s'aperçoit que des points en amont de A et en aval de A donnent des images nettes.

Schéma : Soient  $A_1$  et  $A_2$  les points limites pouvant être vus nets sur l'écran. On trace les faisceaux issus de  $A_1$  et  $A_2$  limités par le diaphragme qui forment une tache de diamètre  $\delta = \varepsilon$  sur le capteur.  
On prend  $D$  (ouverture du diaphragme) = 6 cm,  $f' = 3$  cm,  $\delta = \varepsilon = 1$  cm,  $d = OA' = 5$  cm.



**La profondeur de champ** est l'étendue de la zone de netteté obtenue sur la photographie. Il s'agit alors de la distance entre les premiers et les derniers objets donnant une image nette (ici  $A_1A_2$ )

→ Plus  $A_1A_2$  est grande et plus la profondeur de champ est grande

Plus  $A_1A_2$  est petite et plus la profondeur de champ est petite

Expression de la profondeur de champ en fonction de  $d$ ,  $\varepsilon = \delta$  et du grandissement transversal  $\gamma$

On peut montrer que (à faire pour s'entraîner) :

$$\overline{A_1A_2} = \frac{2d}{\gamma} \frac{\varepsilon/D}{1 - \left(\frac{\varepsilon}{D}\right)^2}$$

$$\text{AN : } \overline{A_1A_2} = 85 \text{ cm pour } \gamma = 1/50$$

Si  $D$  augmente :

## 2. Influence de la durée d'exposition

Plus la durée d'exposition  $\tau$  est grande, plus l'énergie lumineuse traversant le diaphragme est importante (elle est proportionnelle à  $\tau$ ).

Les trois photos de la figure ci-dessous ont été prises avec la même focale et la même ouverture, mais avec des temps de pose de plus en plus longs.

La première (a) est dite ..... car le temps de pose est trop court.

La seconde (b) est .....

La troisième (c) est dite ..... car le temps de pose est trop long.



Influence de la durée d'exposition :

|   | Focale (mm) | Ouverture (N) | Durée d'exposition (s) |
|---|-------------|---------------|------------------------|
| a | 4,7         | 2,8           | 1/1300                 |
| b | 4,7         | 2,8           | 1/400                  |
| c | 4,7         | 2,8           | 1/80                   |

À retenir : Les autres paramètres étant fixés, la luminosité de l'image augmente avec  $\tau$ , durée d'exposition.

### 3. Influence du diamètre du diaphragme D (diamètre d'ouverture)

#### a. Influence de D sur l'exposition

Sur les objectifs d'appareil photo, les valeurs admissibles pour l'ouverture sont exprimées relativement à la valeur de la focale utilisée (variable sur un objectif à zoom). On utilise l'ouverture numérique N (ou nombre d'ouverture), définie par :

$$N = \frac{f'}{D}$$



Différentes valeurs d'ouverture  $D = f' / N$ .

Ainsi, plus N est petit plus l'ouverture est grande pour une focale donnée.

**L'exposition** est la combinaison de la durée d'exposition et de l'ouverture du diaphragme. Plus le diaphragme est ouvert (plus D est grand et N petit), plus le capteur reçoit de la lumière. La luminosité de l'image est proportionnelle à la surface d'ouverture donc à  $D^2$ .

À retenir : Plus le diamètre D est grand, à temps de pose et focale constants, plus l'exposition est grande et plus la photo sera lumineuse.

L'exposition est donc proportionnelle à la fois :

- à la surface d'ouverture donc à  $D^2$
- au temps de pose  $\tau$

→ Elle est donc proportionnelle au produit :  $D^2 \tau$ .

Par exemple, les photos de la figure ci-dessous sont prises respectivement avec une ouverture numérique de  $N = 1,4$  et une vitesse de  $1/60$  s d'une part (a), puis avec une ouverture numérique de  $N = 8,0$  et une vitesse de  $1/2$  s d'autre part (b) (avec  $f'$  fixé).

Vérifier que ces combinaisons correspondent approximativement **à la même exposition** :

De façon plus générale, toutes les combinaisons possibles de  $N$  et  $\tau$  déterminées par l'appareil pour une prise-de-vue donnée doivent correspondre si possible à une même exposition.

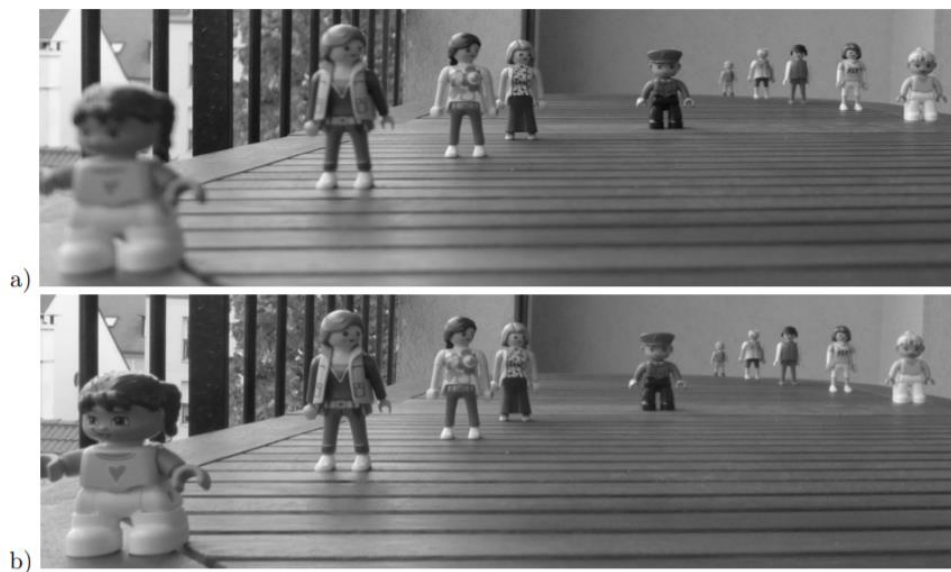
À retenir : La qualité de l'exposition est déterminée par le produit  $D^2 \tau$  à focale constante

### b. Influence de D sur la profondeur de champ

Pour les photos de la figure ci-dessous, la mise-au-point a été faite dans les deux cas sur le personnage central (policier).

Pour la photo a) ( $D$  grand,  $N$  petit), le premier plan et l'arrière-plan sont flous.

Pour la photo b) ( $D$  petit,  $N$  grand), le premier plan et l'arrière-plan sont quasiment nets.



*Influence de l'ouverture sur la profondeur de champ.*

|   | Focale (mm) | Ouverture (N) | Durée d'exposition (s) |
|---|-------------|---------------|------------------------|
| a | 4,7         | 1,4           | 1/60                   |
| b | 4,7         | 8,0           | 1/2                    |

À retenir : La profondeur de champ diminue lorsque le diamètre du diaphragme d'ouverture  $D$  augmente.

Remarque : on avait trouvé ce résultat dans l'expression de la profondeur de champ précédemment : la profondeur de champ est une fonction décroissante de  $D$ .

### 3. Influence de la distance focale

#### a. Influence de la focale sur le champ angulaire

Le champ angulaire est l'angle  $\alpha$  sous lequel est vue la scène photographiée.

*Schéma pour une mise au point à l'infini (montrer que  $\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{\ell}{2f'}$  avec  $\ell$  la largeur du capteur) :*

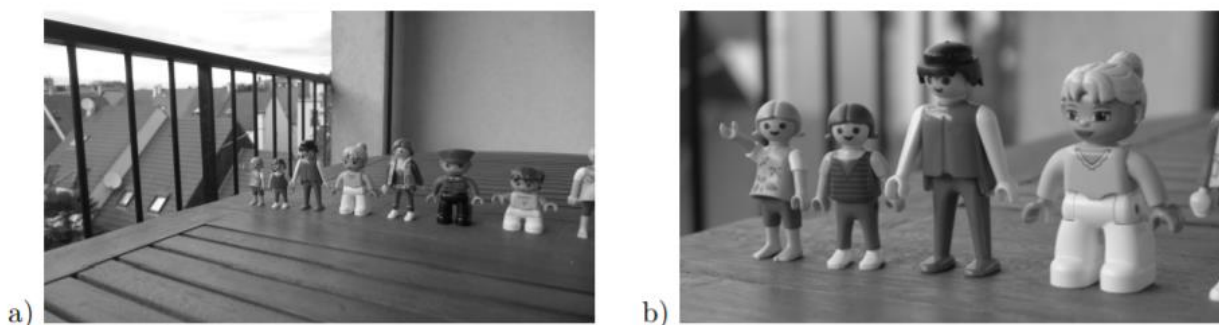
À retenir : Le champ angulaire diminue lorsque l'on augmente la focale, ce qui permet de "zoomer".

#### b. Influence de la focale sur la profondeur de champ

Sur les photos suivantes, on constate que le champ angulaire (champ de vision sur la photo) et la profondeur de champ sont nettement plus grands avec l'objectif de courte focale (photo a)). Les photos de la figure ci-dessous ont été prises du même point-de-vue, et avec la même ouverture  $N = 2,2$  en faisant la mise-au-point sur les personnages. Elles n'ont pas été recoupées.

La photo a) est prise au grand-angle (focale courte)

La photo b) est prise en zoomant au maximum (téléobjectif, focale longue).



|   | Focale (mm) | Ouverture (N) | Durée d'exposition (s) |
|---|-------------|---------------|------------------------|
| a | 4,7         | 2,2           | 1/640                  |
| b | 17,7        | 2,2           | 1/640                  |

*Expliquer l'influence de la focale sur la profondeur de champ, à l'aide d'un schéma.  
On se place dans le cas le plus simple où la mise-au-point est faite sur l'infini. On cherche la position d'un point A' de l'axe optique faisant sur le capteur une tache du diamètre maximum acceptable  $\delta_{\max} = \ell$ .*

|                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------|
| À retenir : La profondeur de champ diminue lorsque la focale augmente. |
|------------------------------------------------------------------------|