



UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

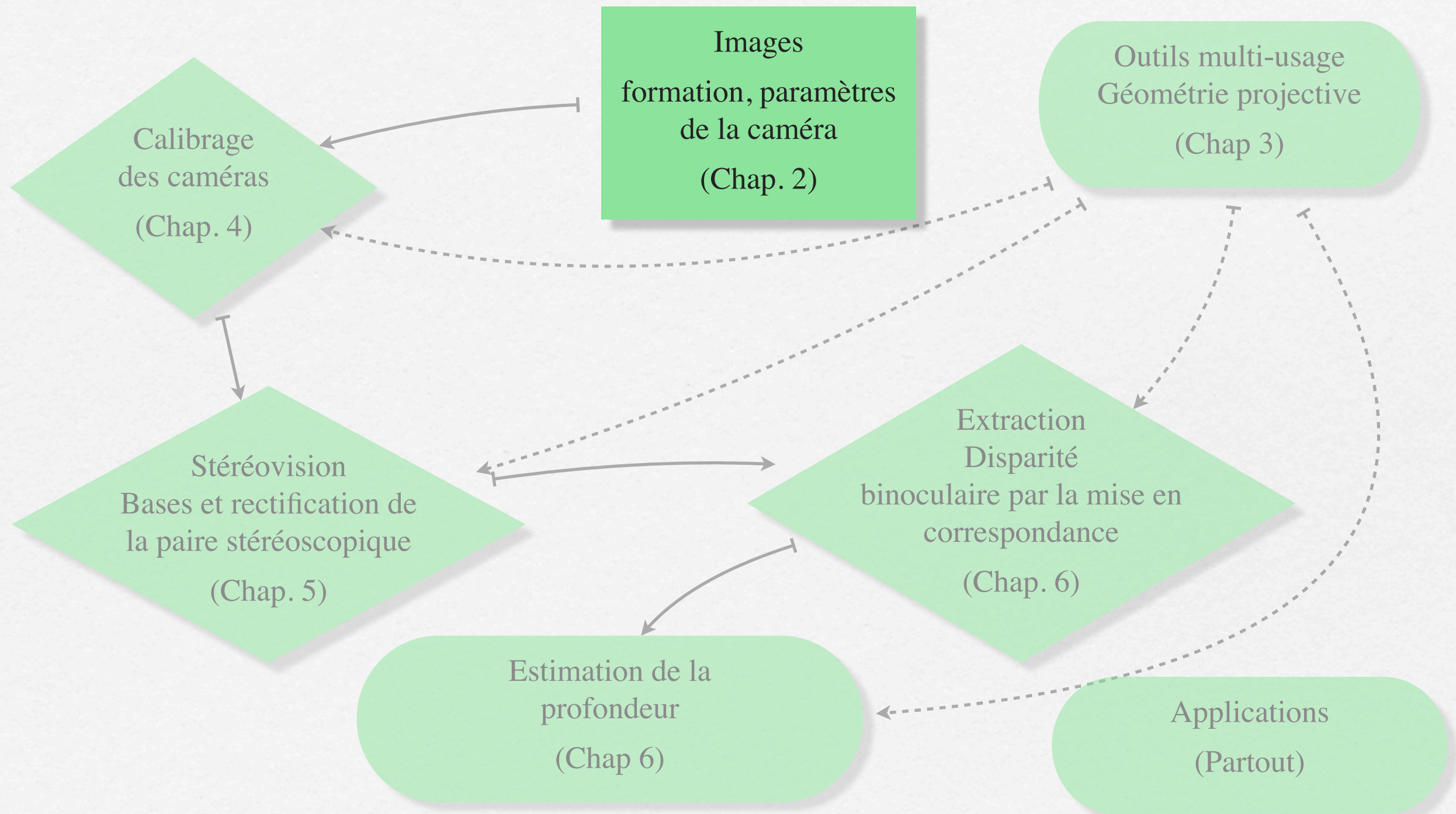
IMN269 - Vision tridimensionnelle

Chapitre 2

Formation d'images et paramètres des caméras pour la stéréovision

notes de cours de
Marie-Flavie Auclair-Fortier
feat. Olivier Godin

Cas de la vision stéréoscopique



Objectifs

● Comprendre les différents paramètres de la formation d'images optiques pour

- Faire le calibrage des caméras
- Comprendre la stéréovision
- La relation entre un point de l'image et sa position dans la scène est liée au processus de formation d'image
- Aussi pour textures, mouvement, perspective, silhouettes

Plan du chapitre

1. Rappels de formation d'image pour la stéréovision

1.1. Repères à considérer

1.2. Phénomènes pertinents

2. Paramètres de la caméra pour la stéréovision

Plan du chapitre

1. Rappels de formation d'image pour la stéréovision

1.1. Repères à considérer

La connaissance des différents repères permet de comprendre le rapport entre un point de la scène et sa projection dans l'image.

- a) Repère de la scène (du monde)
- b) Repères de la caméra et image
- c) Repère pixels

1.2. Phénomènes pertinents

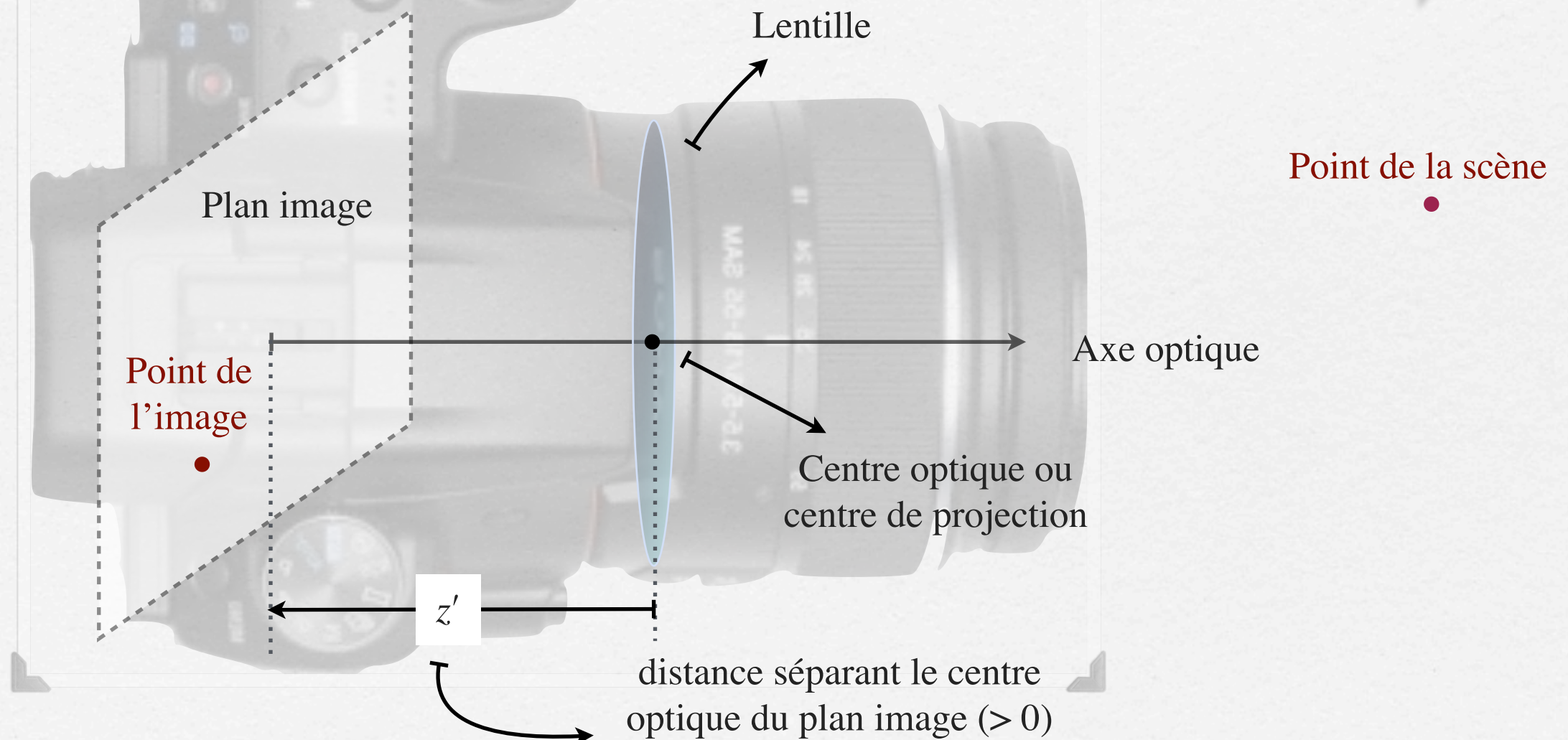
2. Paramètres de la caméra pour la stéréovision

1. Rappels de formation d'image pour la stéréovision

1. Repères à considérer

- Configuration du système de formation optique

On aura besoin de 4 repères différents



1. Rappels de formation d'image pour la stéréovision

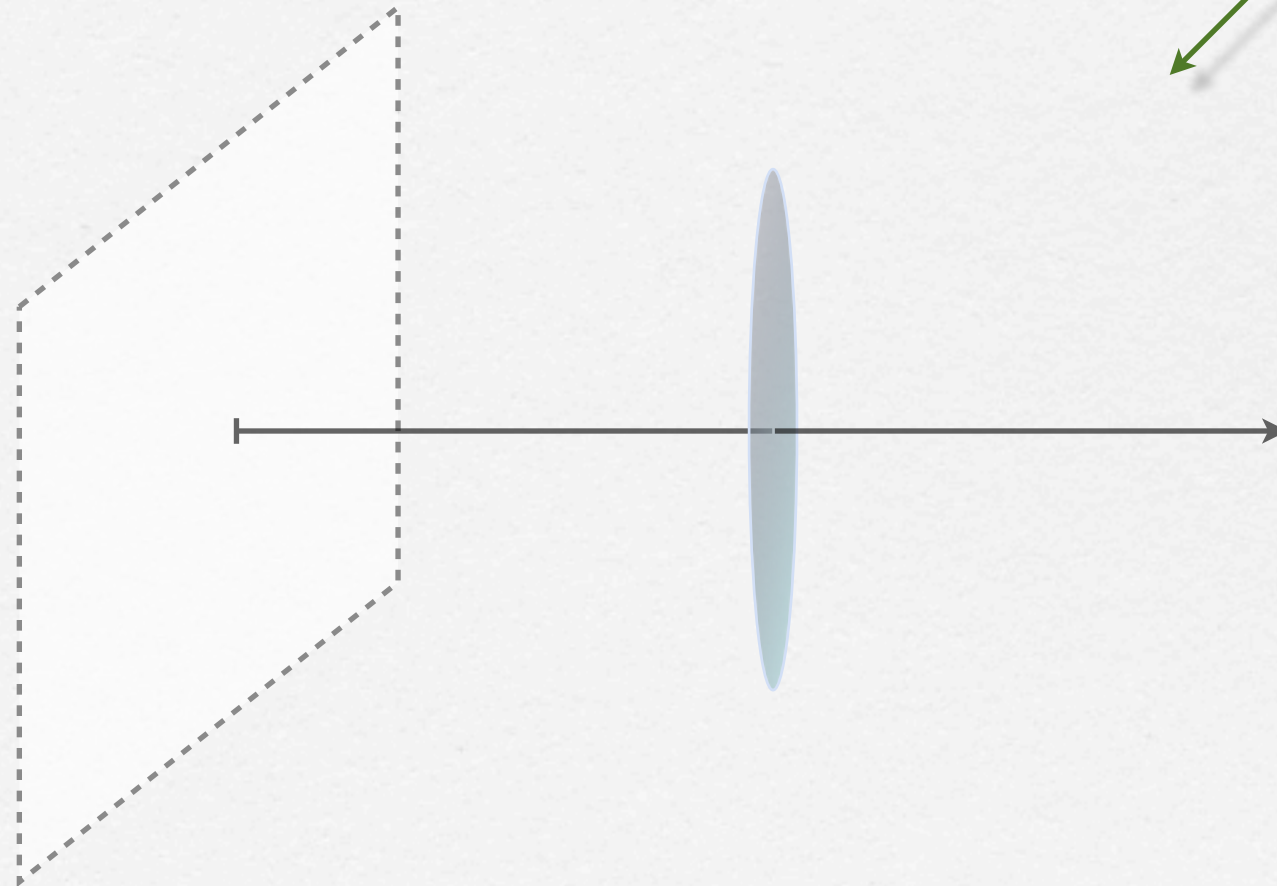
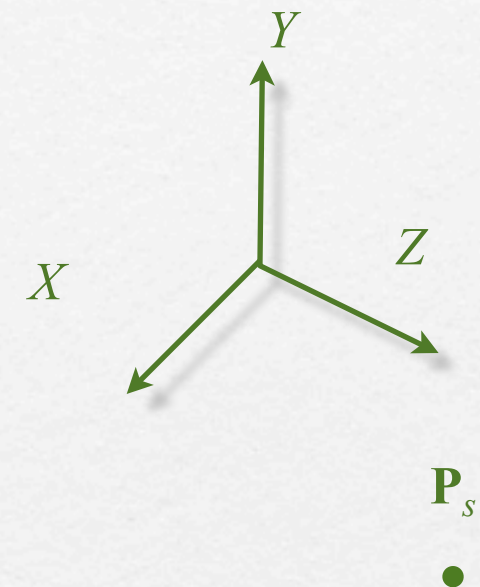
1. Repères à considérer

a) Repère de la scène (du monde)

Le repère de la scène permet d'établir un lien géométrique entre les objets de la scène 3D, incluant les caméras.

- \mathbf{P}_s : point de la scène dans le repère de la scène
- Coordonnées 3D : notées en majuscules
- Coordonnées réelles : $\mathbb{R} \times \mathbb{R} \times \mathbb{R}$
- Notation : $\mathbf{P}_s = (X_s, Y_s, Z_s)$

Repère de la scène



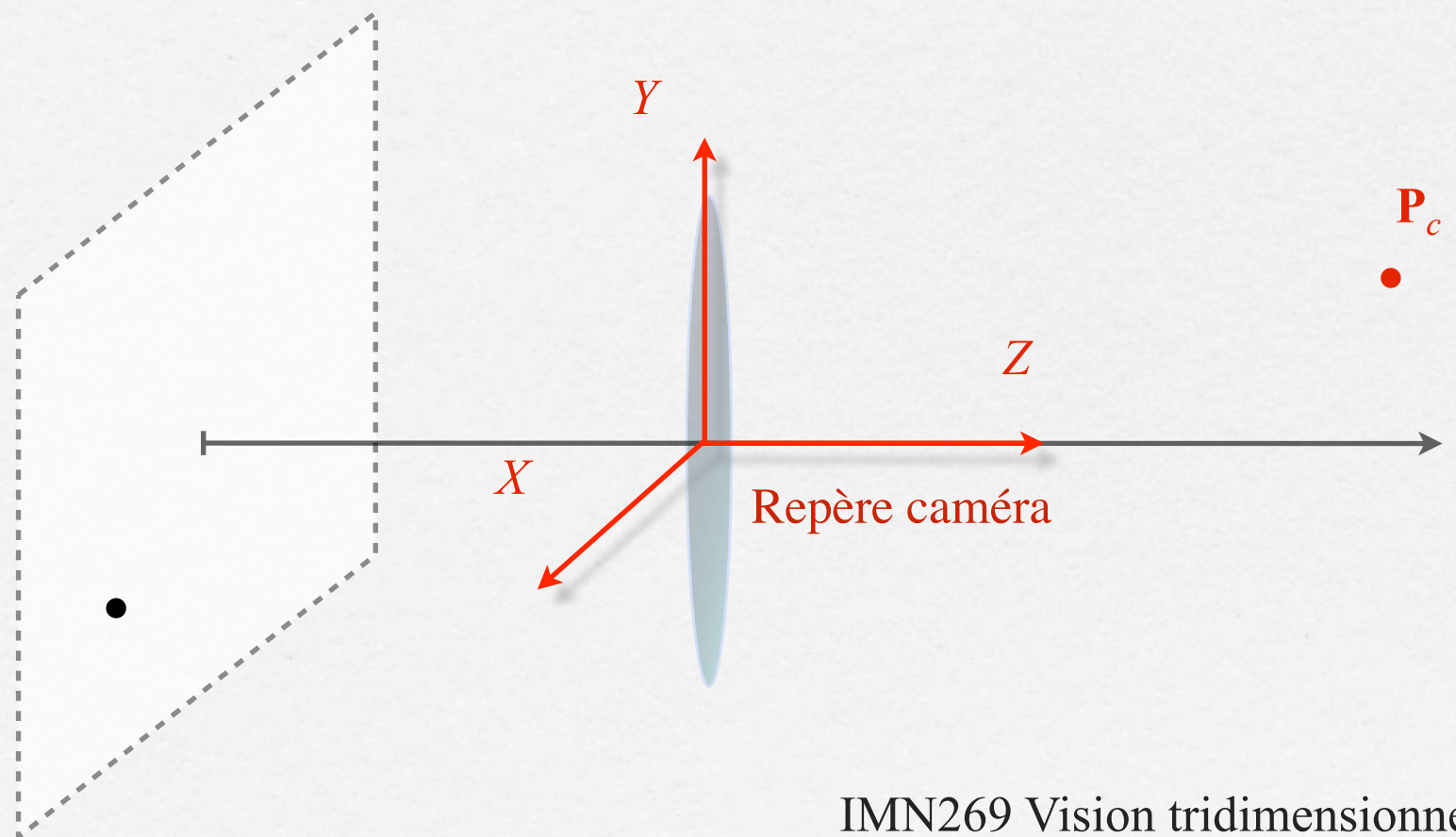
1. Rappels de formation d'image pour la stéréovision

1. Repères à considérer

b) Repères de la caméra et image

Les repères caméra et image permettent de relier plus facilement le point de la scène avec sa projection dans l'image.

- P_c : point de la scène dans le repère de la caméra
- On exprime le même point de la scène dans un repère différent
- Coordonnées réelles : $\mathbb{R} \times \mathbb{R} \times \mathbb{R}$
- Toujours centré au centre optique
- L'axe des Z pointe vers la scène
- Notation : $P_c = (X_c, Y_c, Z_c)$



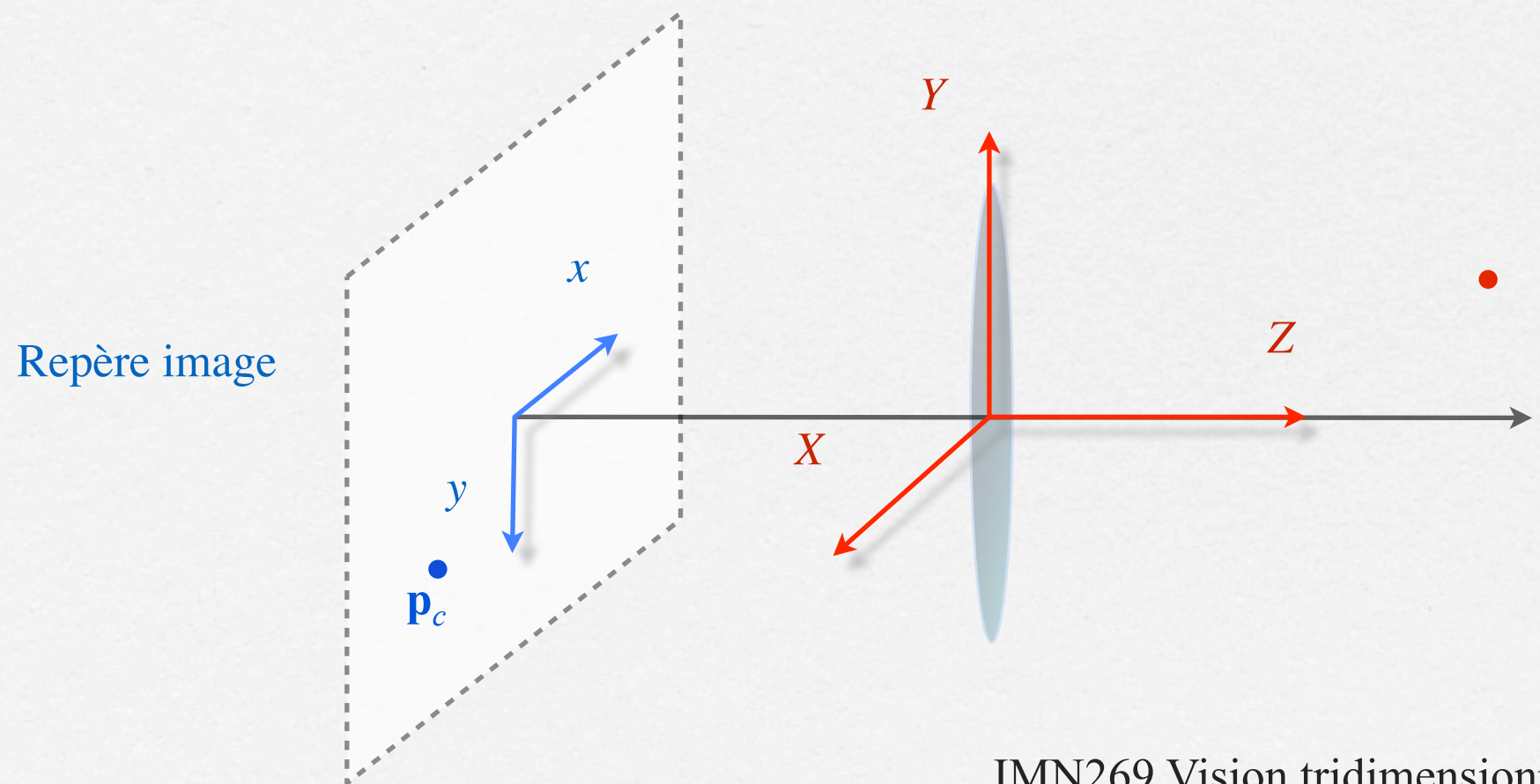
1. Rappels de formation d'image pour la stéréovision

1. Repères à considérer

b) Repères de la caméra et image

Le repère de l'image réelle sert à évaluer facilement la projection d'un point de la scène sur l'image.

- \mathbf{p}_c : point de l'image dans le repère de l'image réelle
- L'origine est positionnée au point d'intersection entre l'axe optique et le plan image
- Coordonnées 2D : notées en minuscules
- Coordonnées réelles : $\mathbb{R} \times \mathbb{R}$
- Notation : $\mathbf{p}_c = (x_c, y_c)$
- À noter : l'image est inversée



1. Rappels de formation d'image pour la stéréovision

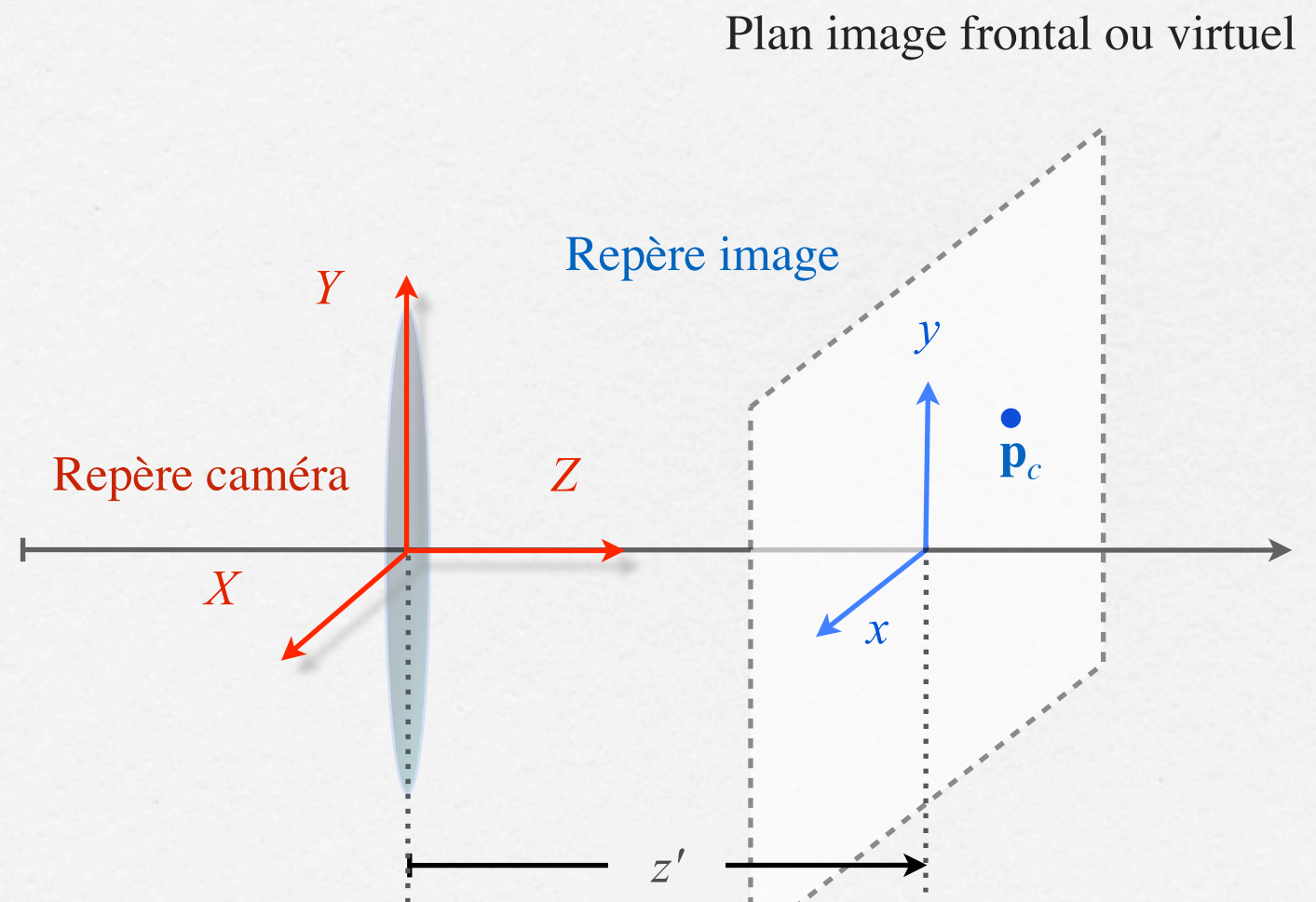
1. Repères à considérer

b) Repères de la caméra et image

- Image frontale
 - ✓ Plus pratique pour la modélisation : l'image est à l'endroit
 - ✓ Les axes sont inversés
 - ✓ Le repère correspond à la projection du repère caméra sur l'image frontale
 - ✓ On peut donc aussi exprimer en 3D :
 $\mathbf{p}_c = (x_c, y_c, z')$

Remarque

- On peut représenter l'image en arrière de la lentille ou en avant
 - ➔ Image frontale



1. Rappels de formation d'image pour la stéréovision

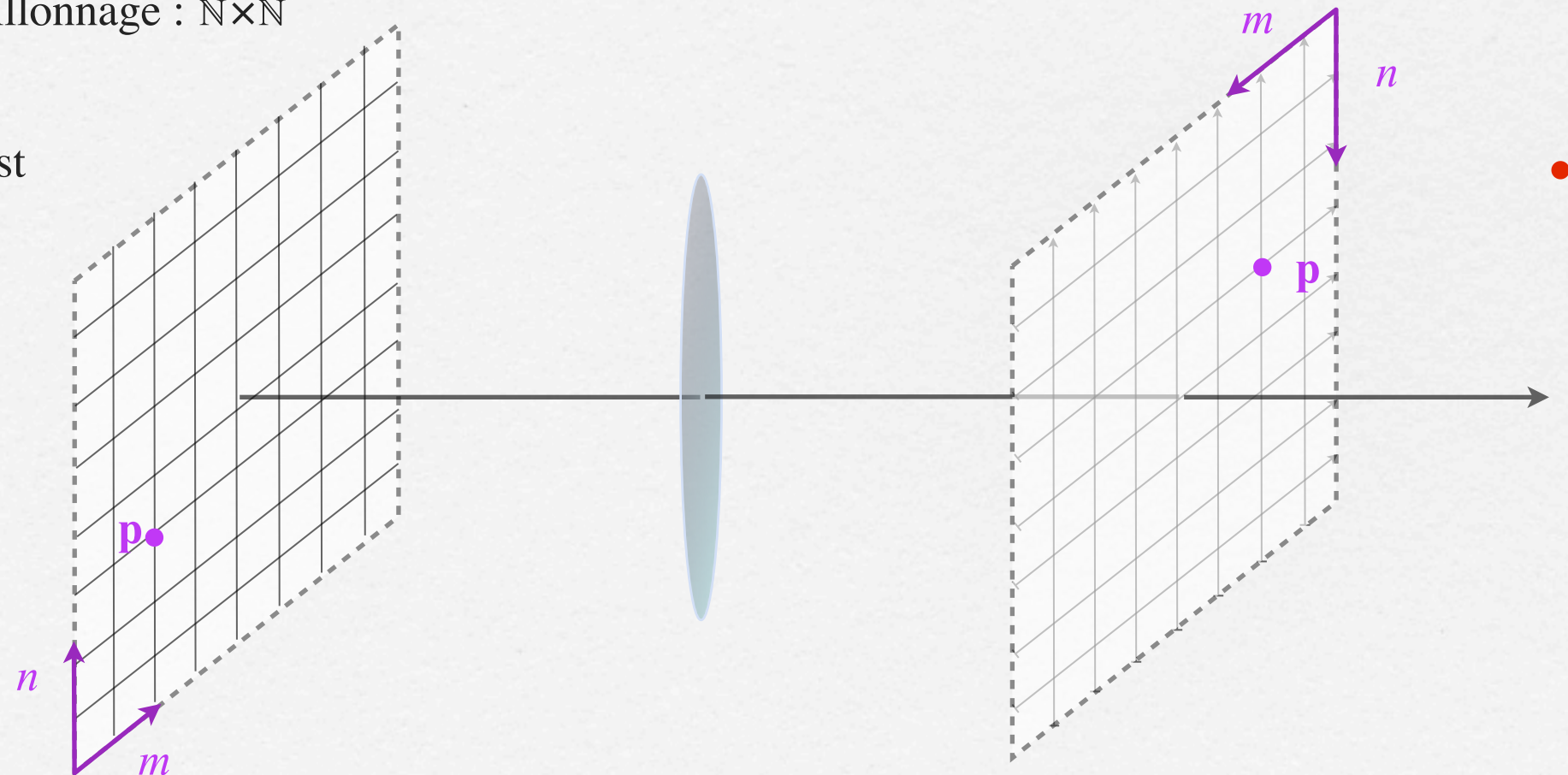
1. Repères à considérer

c) Repère des pixels

Le repère des pixels permet d'exprimer le point de l'image en pixels qui sont facilement lisibles par un programme informatique.

- \mathbf{p} : point de l'image dans le repère des pixels
- Prends en compte l'échantillonnage : $\mathbb{N} \times \mathbb{N}$
- Notation : $\mathbf{p} = (m, n)$
- Par convention, l'origine est en haut à gauche sur l'image frontale

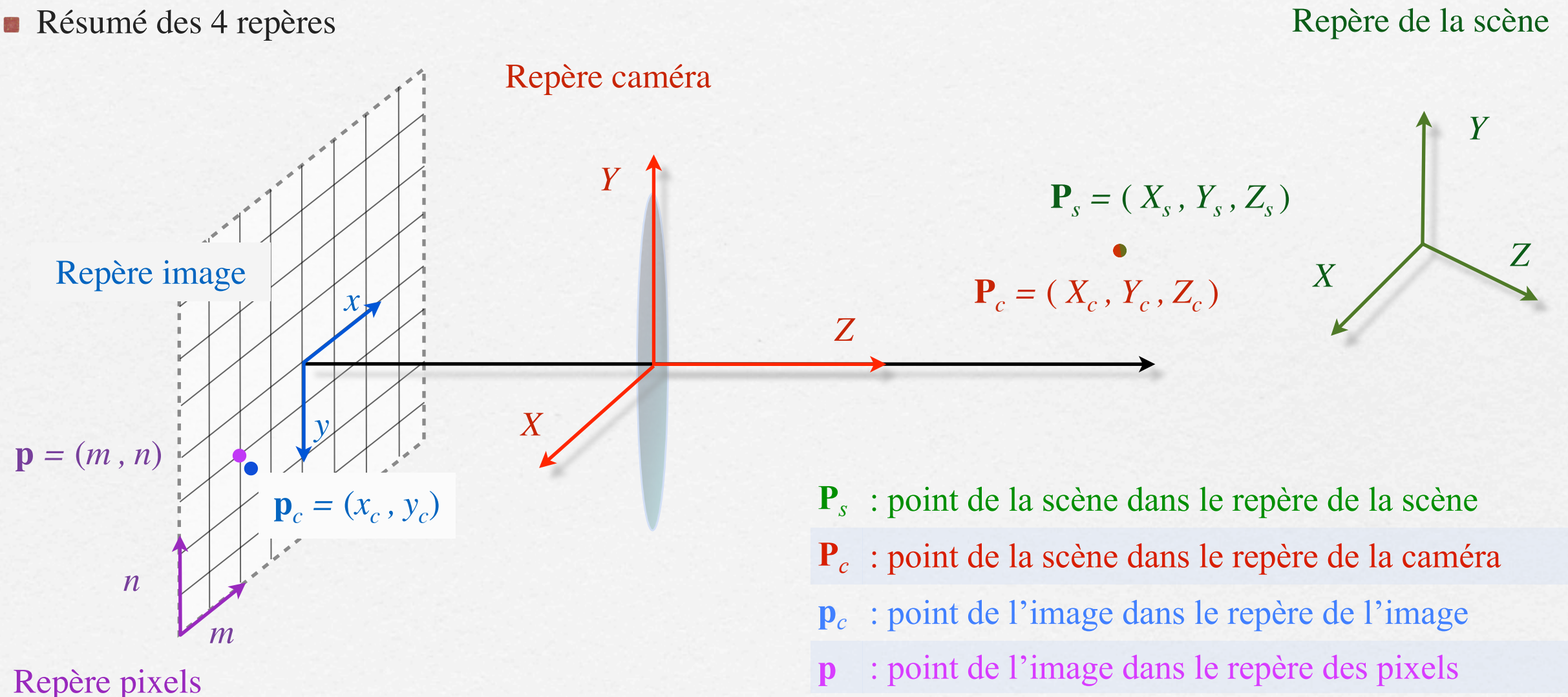
Repère pixels



1. Rappels de formation d'image pour la stéréovision

1. Repères à considérer

■ Résumé des 4 repères



P_s : point de la scène dans le repère de la scène

P_c : point de la scène dans le repère de la caméra

p_c : point de l'image dans le repère de l'image

p : point de l'image dans le repère des pixels

Plan du chapitre

1. Rappels de formation d'image pour la stéréovision

1.1. Repères à considérer

1.2. Phénomènes pertinents

On s'intéresse à tout ce qui affecte la coordonnée pixel d'un point de la scène projeté dans l'image.

- a) Géométrie
- b) Optique
- c) Numérisation

2. Paramètres de la caméra pour la stéréovision

1. Rappels de formation d'image pour la stéréovision

2. Phénomènes pertinents

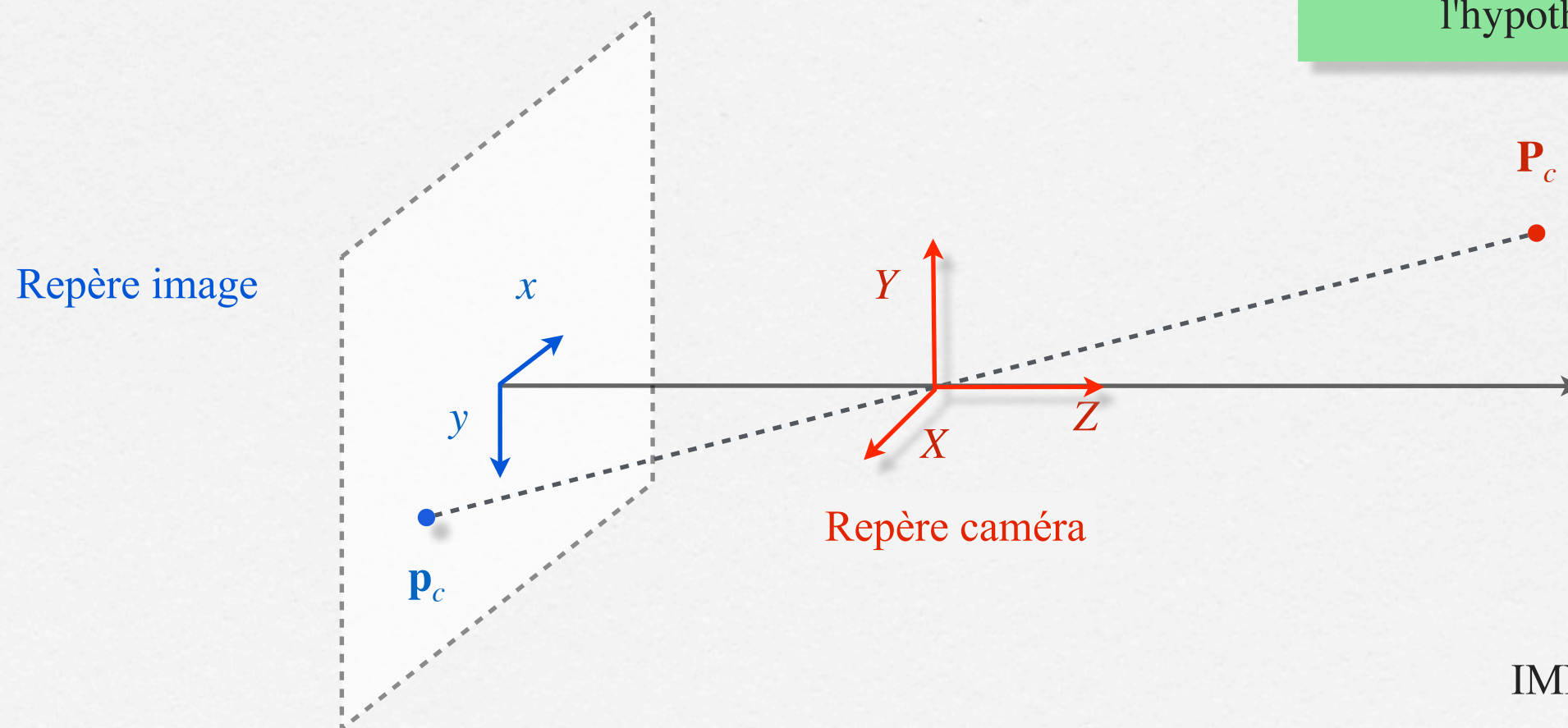
a) Géométrie

Les relations géométriques servent à déterminer la position idéale dans l'image où un point de la scène est projeté.

- Projection perspective : passer du repère de la caméra au repère de l'image

✓ On veut trouver \mathbf{p}_c en connaissant \mathbf{P}_c et le système de formation

Modèle de la caméra à sténopé qui est l'hypothèse la plus courante



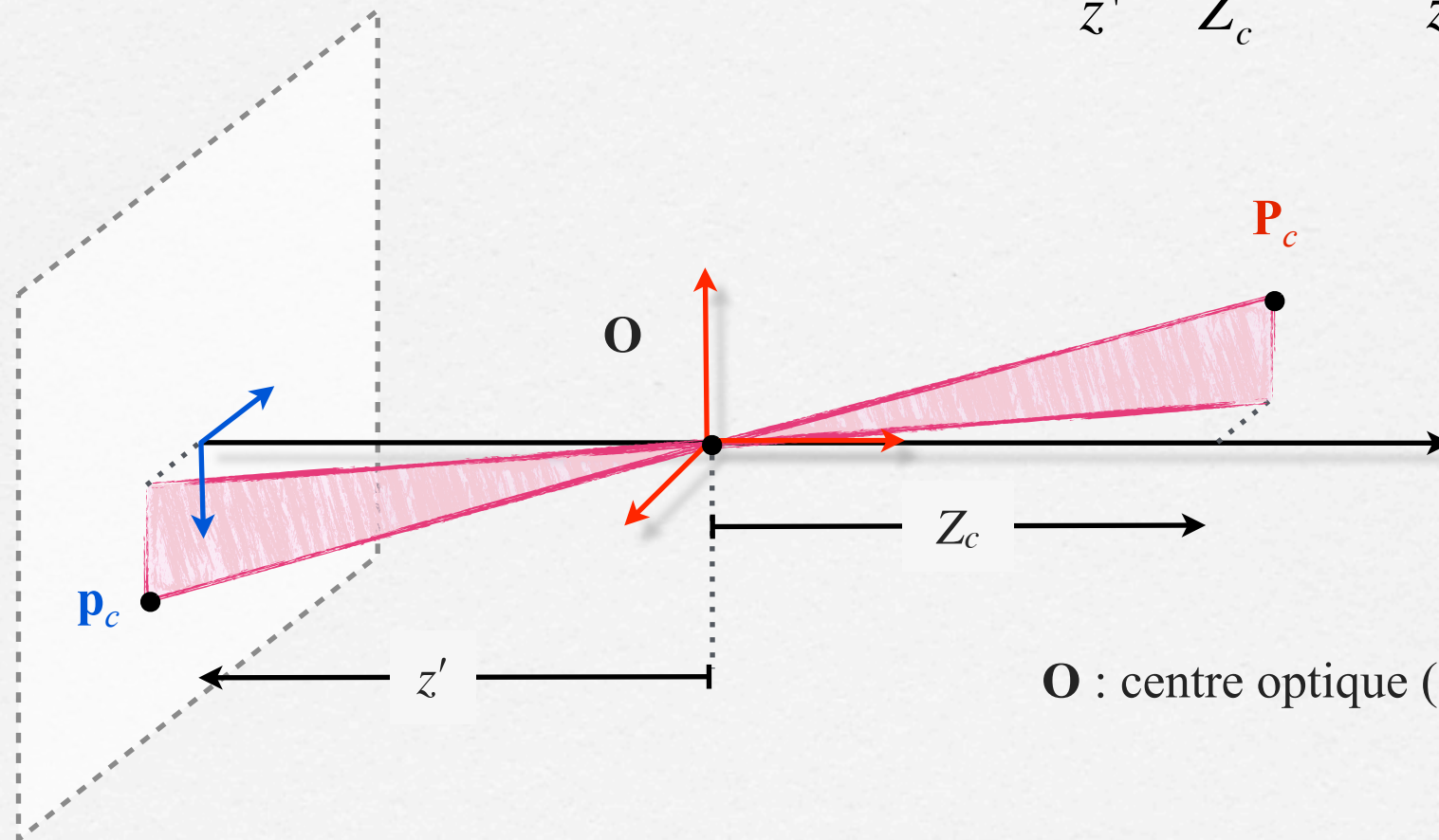
1. Rappels de formation d'image pour la stéréovision

2. Phénomènes pertinents

a) Géométrie

- Projection perspective, caméra à sténopé

$$\frac{x_c}{z'} = \frac{X_c}{Z_c} \quad \text{et} \quad \frac{y_c}{z'} = \frac{Y_c}{Z_c} \quad \text{par les triangles semblables}$$



O : centre optique (de projection) de la caméra

Remarque

- On utilise parfois la projection perspective faible (c.f. IMN119)

1. Rappels de formation d'image pour la stéréovision

2. Phénomènes pertinents

a) Géométrie

- Projection perspective, caméra à sténopé

$$\frac{x_c}{z'} = \frac{X_c}{Z_c} \quad \text{et} \quad \frac{y_c}{z'} = \frac{Y_c}{Z_c}$$

Ces équations sont non linéaires, car elles dépendent de la profondeur du point Z_c . C'est grâce à cette relation avec la profondeur qu'il sera possible de la retrouver à l'aide de l'information 2D.

1. Rappels de formation d'image pour la stéréovision

2. Phénomènes pertinents

a) Optique

- L'ajout d'une lentille pour éclaircir les images permet de diminuer la quantité de flou (IMN119 + IMN529) mais crée des distorsions dans la projection des rayons sur le plan image. Ces distorsions sont dépendantes de la position de la projection du pixel dans l'image.



1. Rappels de formation d'image pour la stéréovision

2. Phénomènes pertinents

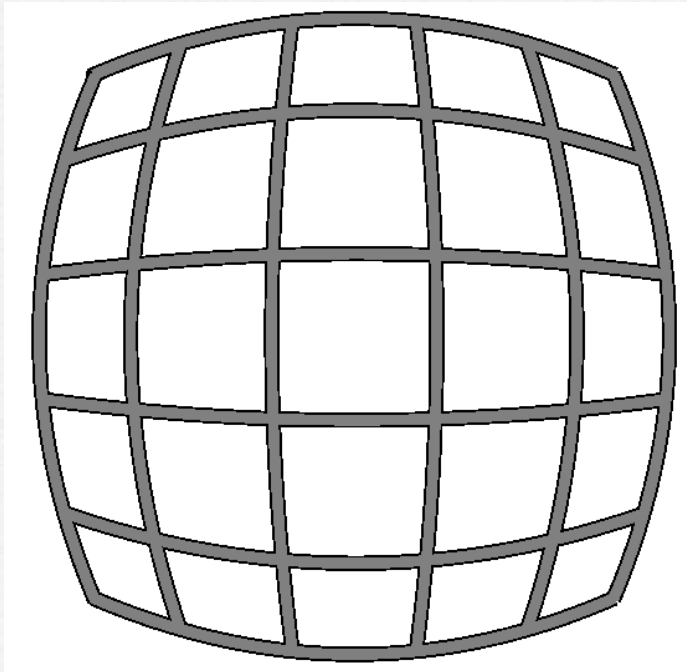
a) Optique

■ Distorsion radiale

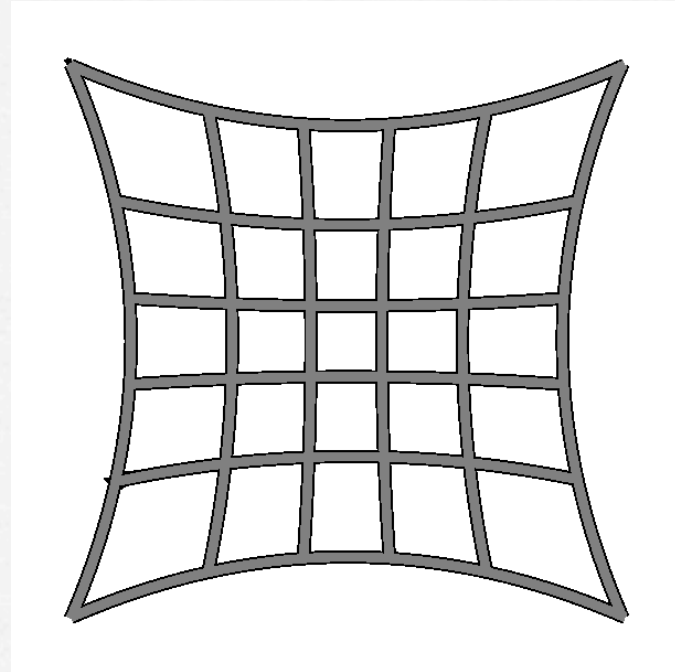
- ✓ Plus le pixel est éloigné du centre optique, plus la distorsion est importante

Remarques

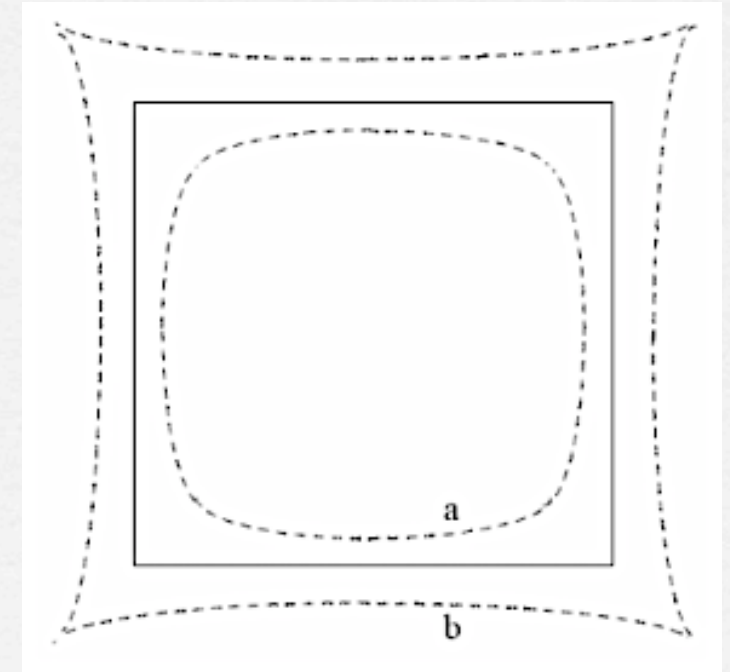
- Si on ne tiens pas compte de la distorsion, cela pourrait fausser la reconstruction
 - hypothèse de la projection perspective



Type barillet



Type coussinet



ligne pleine : image non distordue

1. Rappels de formation d'image pour la stéréovision

2. Phénomènes pertinents

a) Optique

■ Distorsion radiale

Le fait que le plan image soit plat introduit une distorsion dans les images. Cette distorsion est due au fait que la forme de la projection d'un objet dépend de sa position par rapport au centre de projection et au plan image.

Posons p_d le point distordu associé au point p_c . On peut modéliser la distorsion par

$$x_d = x_c(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4)$$

$$y_d = y_c(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4)$$

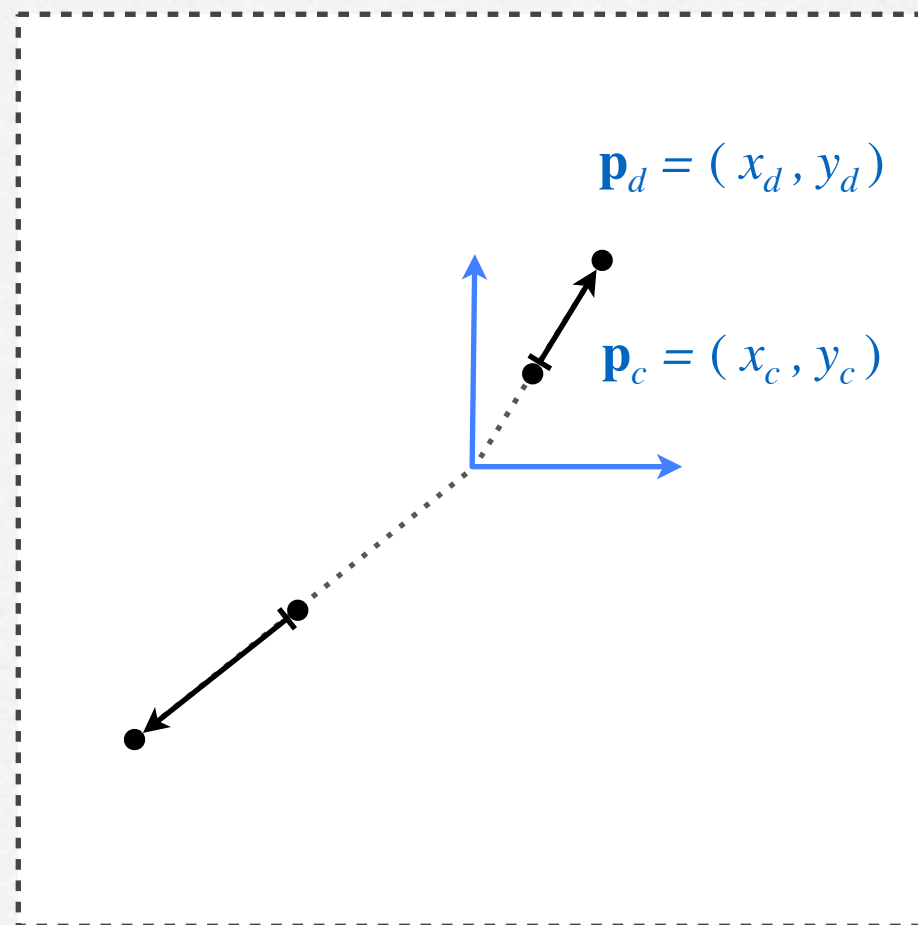
On appelle k_1 et k_2 les coefficients de distorsion associés à la lentille.

1. Rappels de formation d'image pour la stéréovision

2. Phénomènes pertinents

a) Optique

■ Distorsion radiale



Bleu : repère image

1. Rappels de formation d'image pour la stéréovision

2. Phénomènes pertinents

a) Numérisation

- Permet de passer du repère image au repère pixel
- Jusqu'à présent, on a considéré l'image comme continue avec des coordonnées réelles



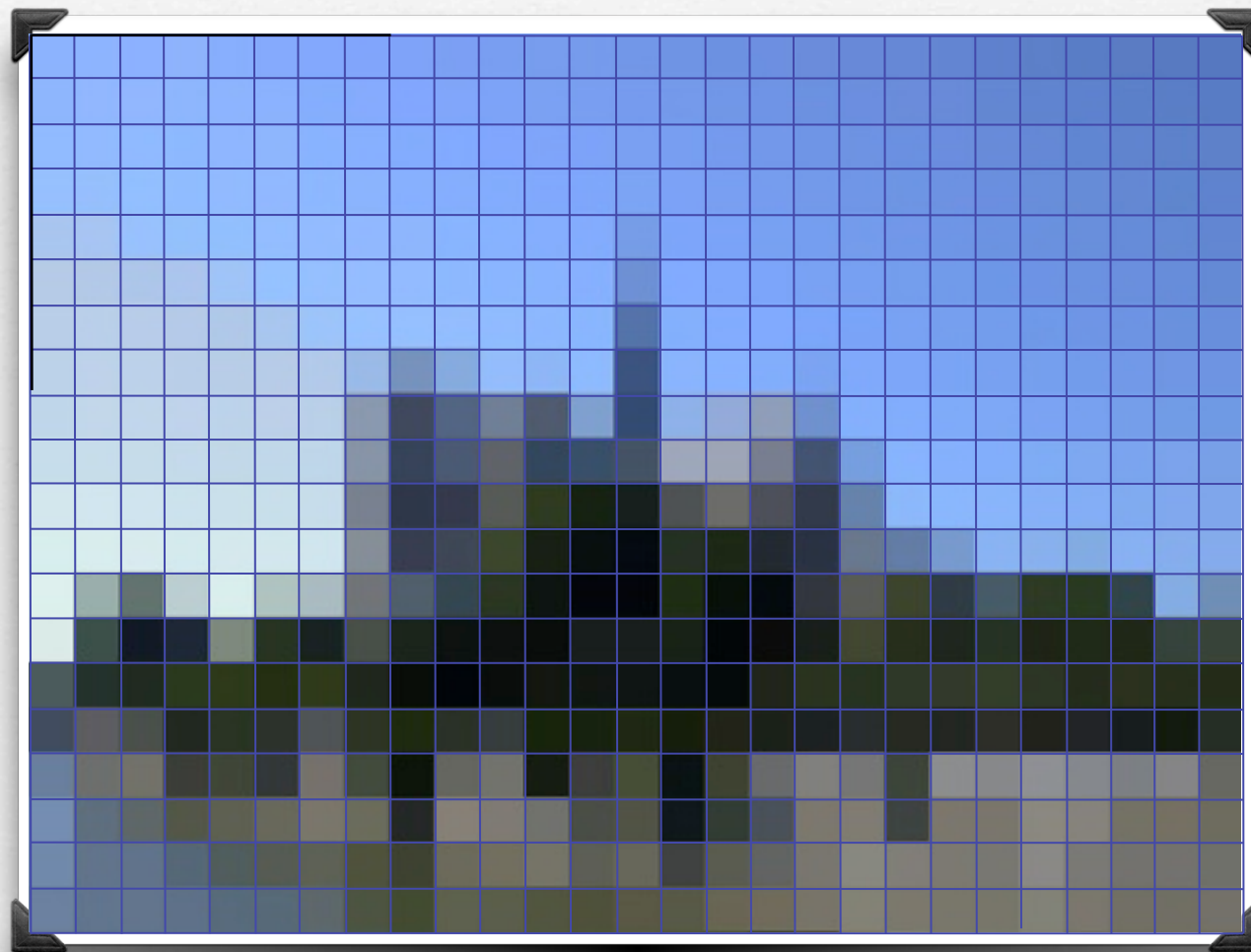
Une image « réelle »

1. Rappels de formation d'image pour la stéréovision

2. Phénomènes pertinents

a) Numérisation

- À cause du stockage, l'appareil numérique transforme l'image continue en image discrète
- Pour faciliter la référence, le repère est modifié (convention)



Une image informatique

1. Rappels de formation d'image pour la stéréovision

2. Phénomènes pertinents

a) Numérisation

Pour effectuer la numérisation, on découpe d'abord le domaine continu en petits rectangles à intervalles égaux.

$$m_e = \left\lfloor \frac{x_d}{S_x} + 0,5 \right\rfloor \qquad n_e = \left\lfloor \frac{y_d}{S_y} + 0,5 \right\rfloor$$

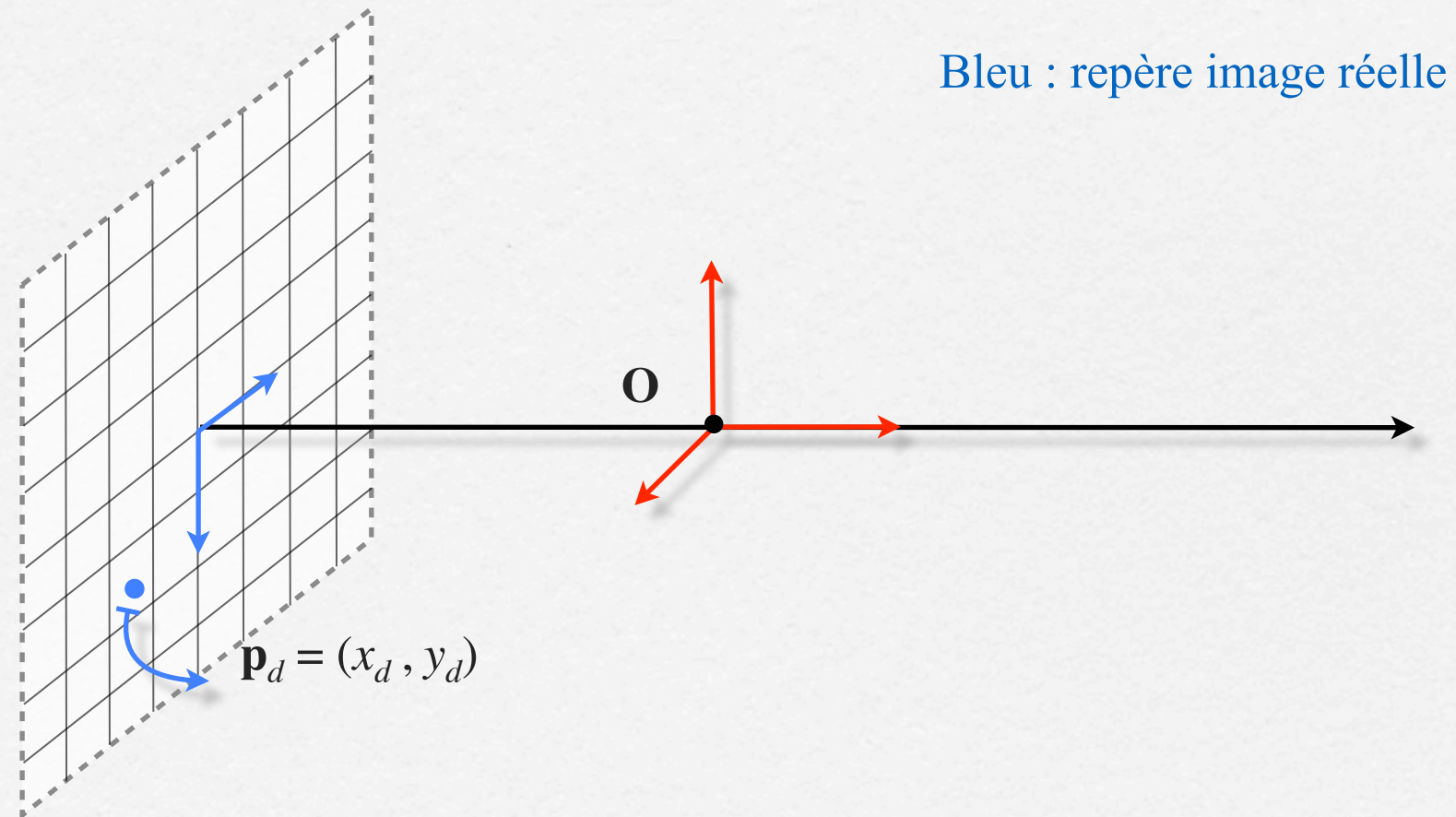
$p_e = (m_e, n_e)$ est le point échantillonné dans l'espace $\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}$ et (S_x, S_y) définit la grosseur d'un pixel en mm.

1. Rappels de formation d'image pour la stéréovision

2. Phénomènes pertinents

a) Numérisation

■ Échantillonnage



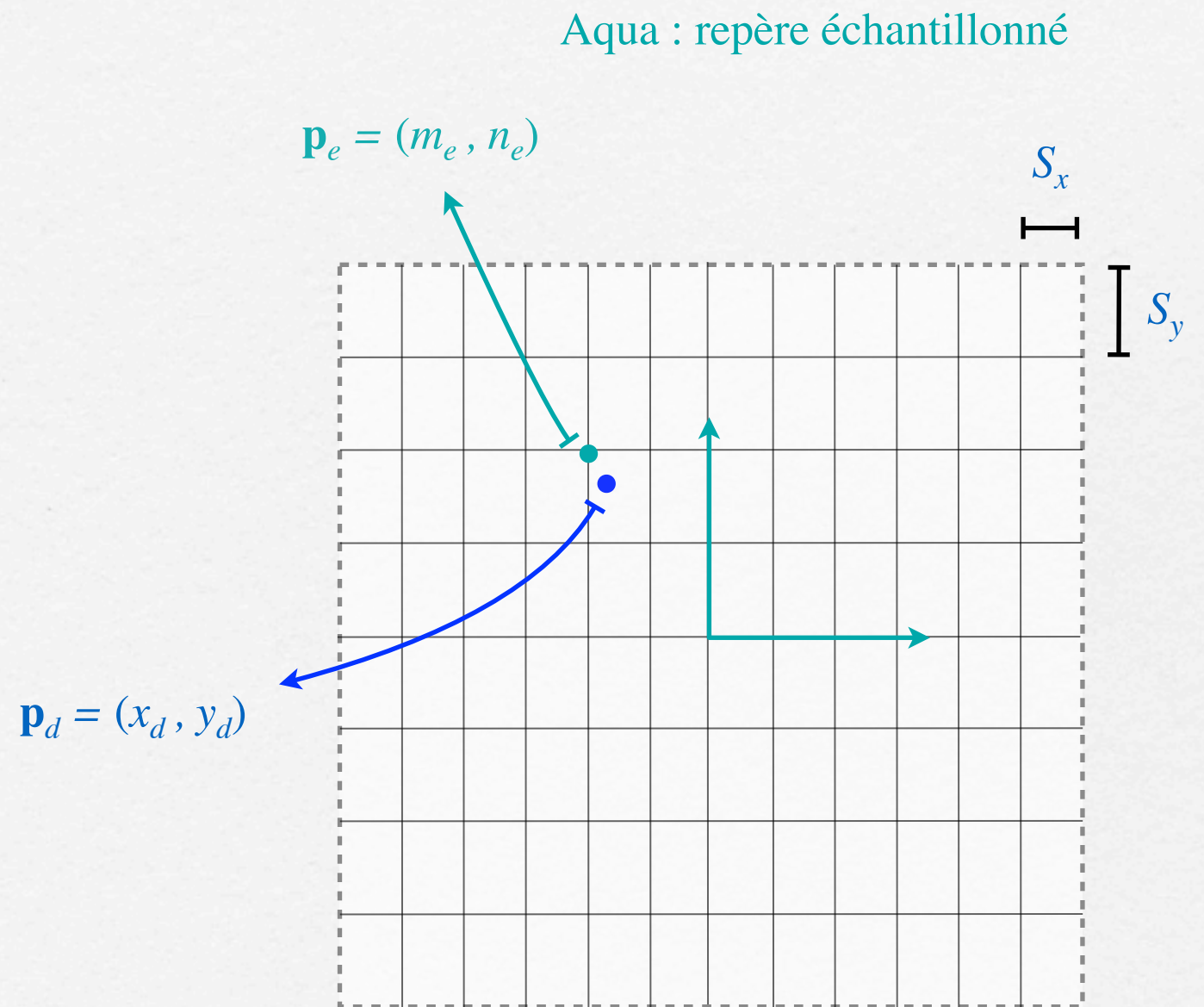
1. Rappels de formation d'image pour la stéréovision

2. Phénomènes pertinents

a) Numérisation

■ Échantillonnage

- ✓ l'échelle a changé mais il reste des coordonnées négatives
- ✓ crée des erreurs de positionnement (bruit)
- ✓ $\alpha = S_x / S_y$: **format du pixel**
« aspect ratio » (pas d'unité)
- ✓ $\mathbf{p}_e \in \mathbb{Z} \times \mathbb{Z}$
- ✓ parfois on exprime plutôt le nombre de pixels par mm
 - ➔ $k_x = 1/S_x$
 - ➔ $k_y = 1/S_y$



1. Rappels de formation d'image pour la stéréovision

2. Phénomènes pertinents

a) Numérisation

■ Changement de repère

On s'attarde maintenant à l'élimination des coordonnées négatives. Posons $p = (m, n)$ les coordonnées d'un point dans le repère des pixels. On peut écrire

$$m = m_e + O_m \qquad n = -n_e + O_n$$

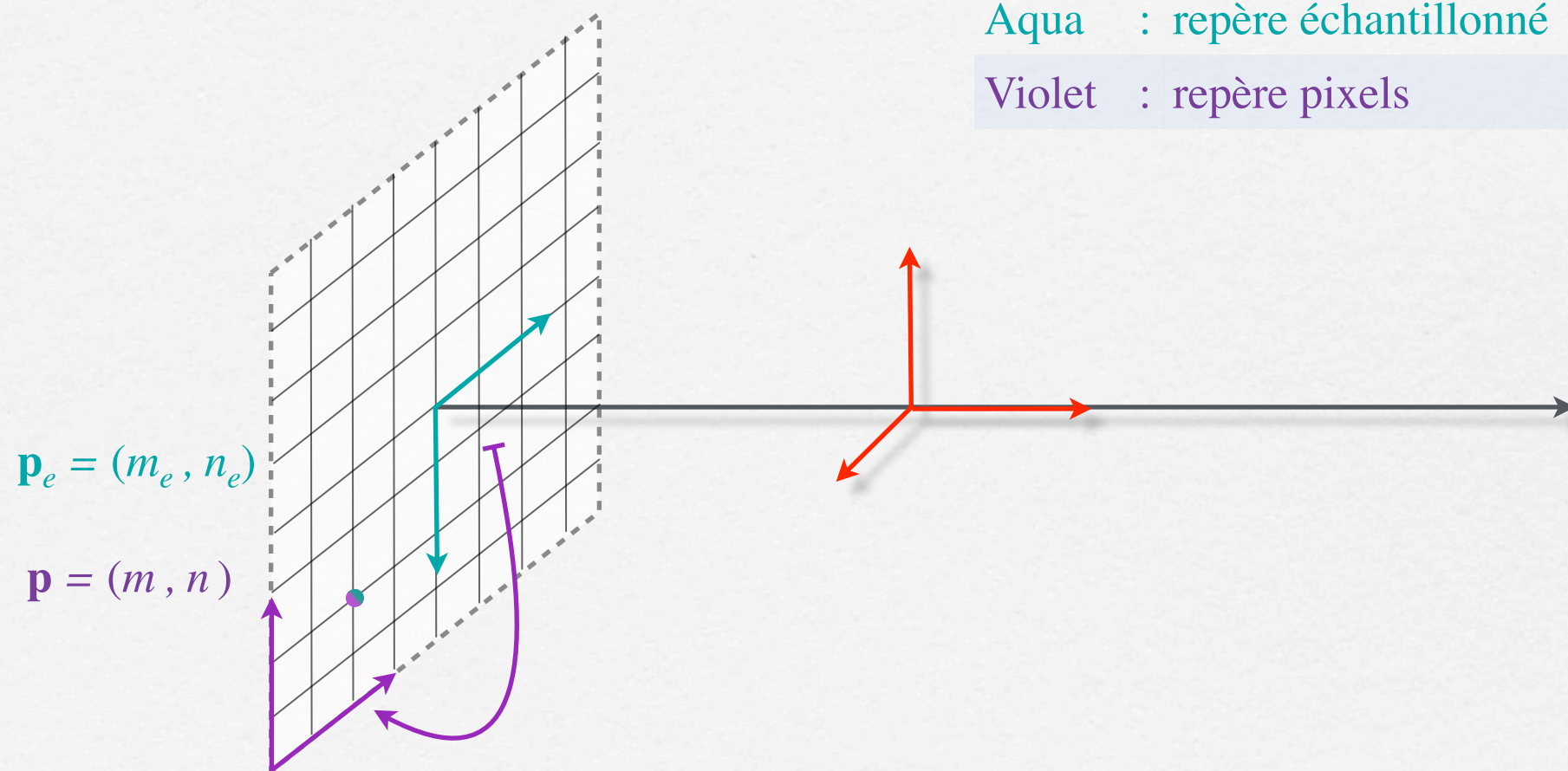
où $O = (O_m, O_n)$ sont les coordonnées de l'axe optique en coordonnées pixels.

1. Rappels de formation d'image pour la stéréovision

2. Phénomènes pertinents

a) Numérisation

■ Changement de repère

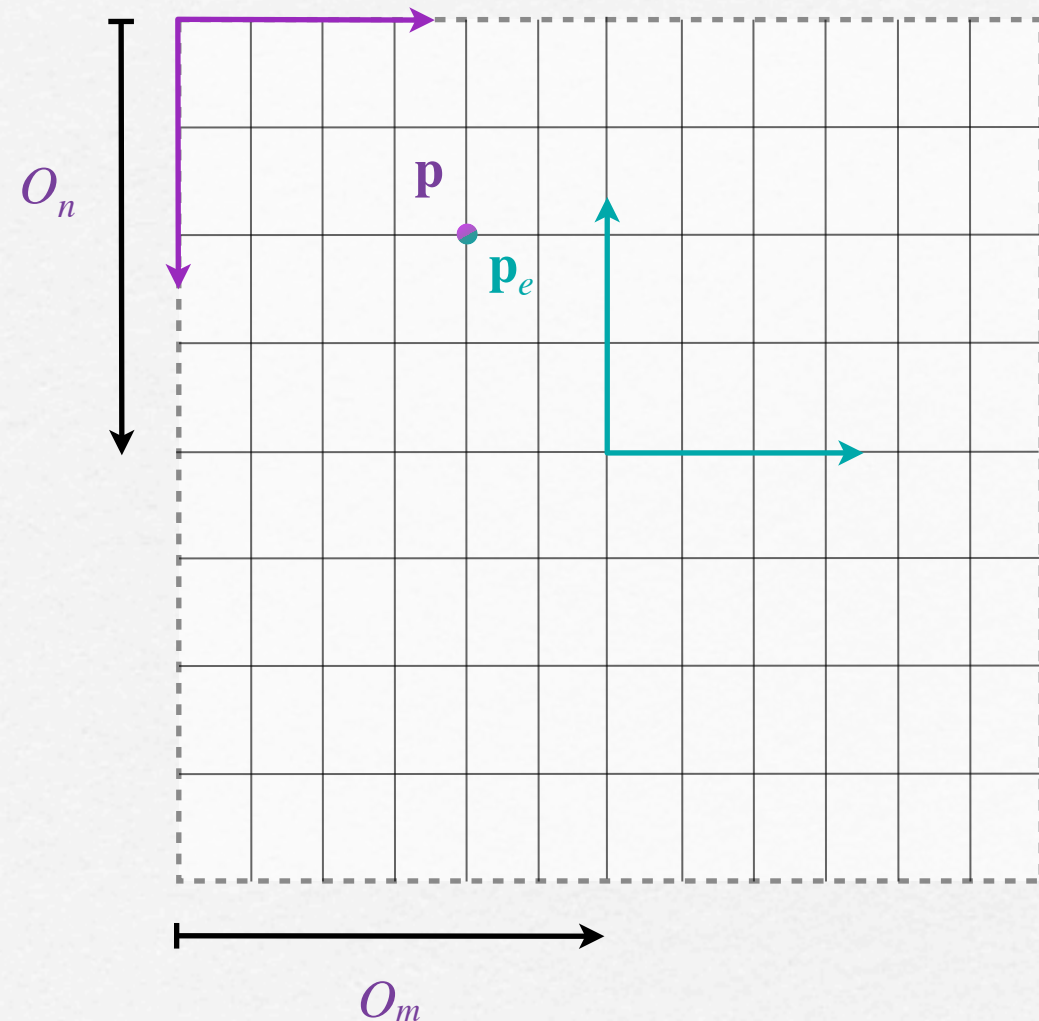


1. Rappels de formation d'image pour la stéréovision

2. Phénomènes pertinents

a) Numérisation

- Changement de repère
 - ✓ Inversion de l'axe des y
 - ✓ Déplacement de l'origine
 - ✓ $\mathbf{p} \in \mathbb{N} \times \mathbb{N}$

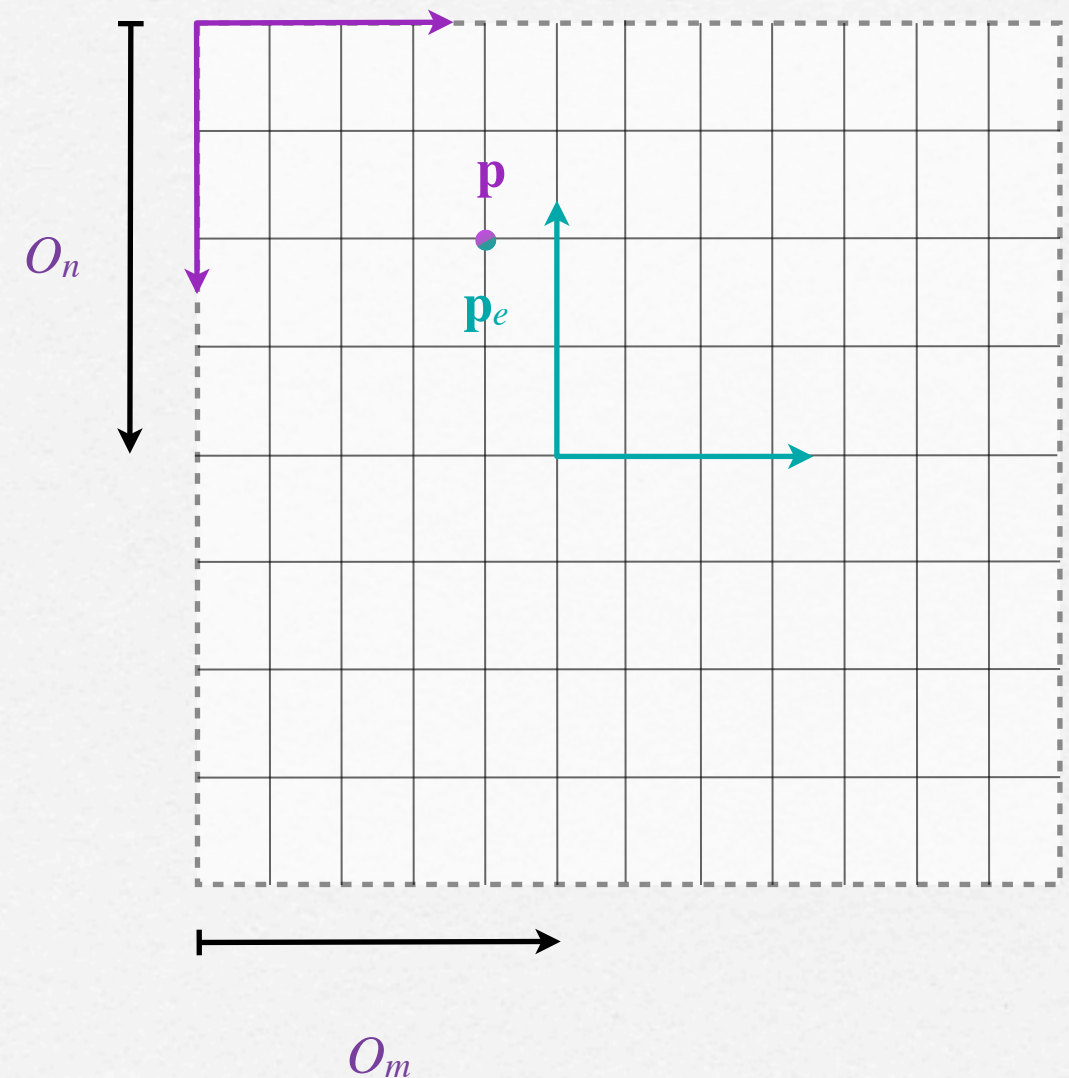


1. Rappels de formation d'image pour la stéréovision

2. Phénomènes pertinents

a) Numérisation

- Il se peut que l'axe optique ne soit pas exactement au milieu de l'image réelle



Plan du chapitre

1. Rappels de formation d'image pour la stéréovision

2. Paramètres de la caméra pour la stéréovision

2.1. Paramètres extrinsèques

2.2. Paramètres intrinsèques

Plan du chapitre

1. Rappels de formation d'image pour la stéréovision

2. Paramètres de la caméra pour la stéréovision

2.1. Paramètres extrinsèques

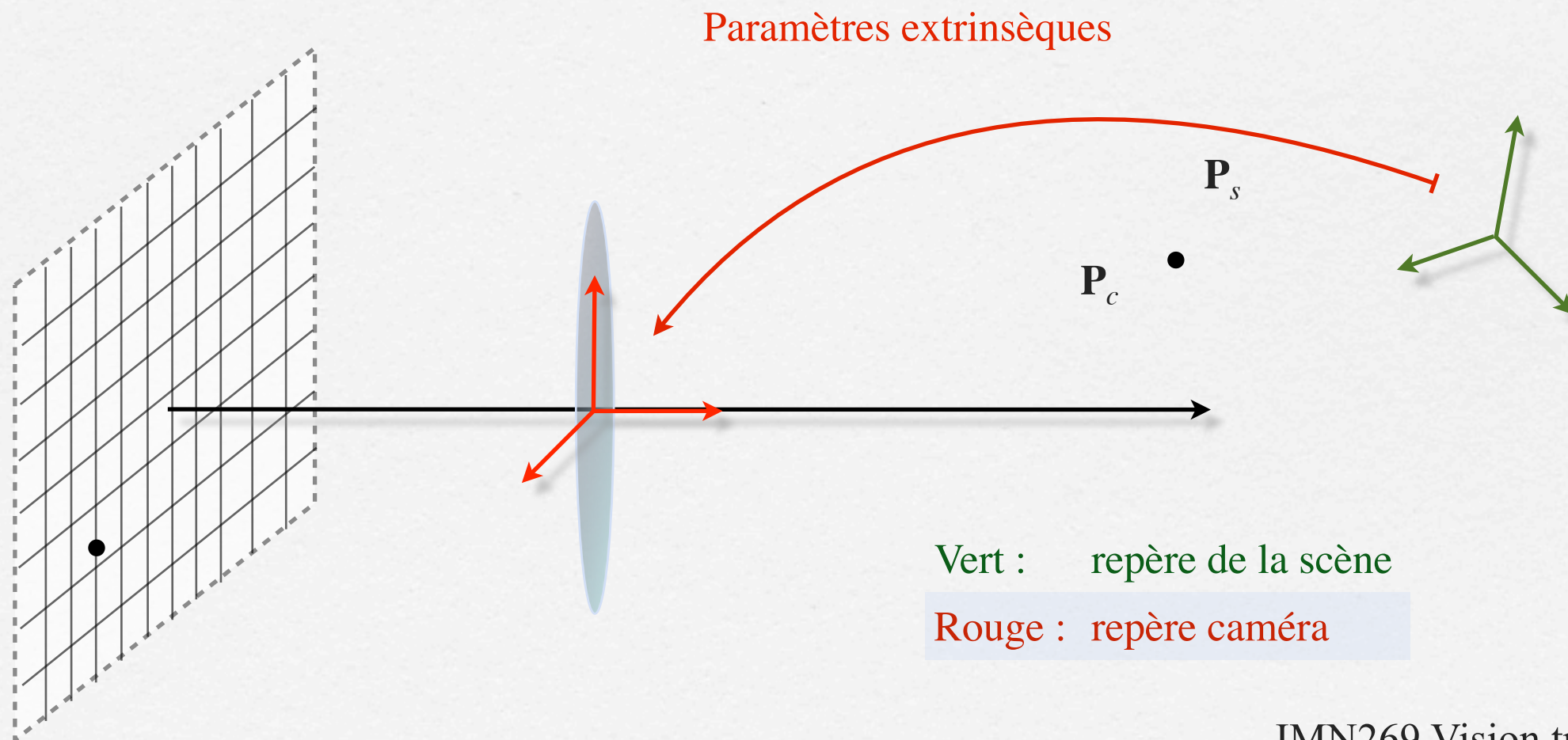
Les paramètres extrinsèques permettent d'exprimer la transformation entre le repère de la scène et le repère de la caméra.

2.2. Paramètres intrinsèques

2. Paramètres de la caméra pour la stéréovision

1. Paramètres extrinsèques

- Aspects externes de la caméra
- Position et orientation (du repère) de la caméra en fonction (du repère) de la scène



2. Paramètres de la caméra pour la stéréovision

1. Paramètres extrinsèques

On cherche d'abord à orienter les deux repères de la même façon à l'aide d'une matrice de rotation 3×3 .

$$R^c = \begin{bmatrix} R_{11}^c & R_{12}^c & R_{13}^c \\ R_{21}^c & R_{22}^c & R_{23}^c \\ R_{31}^c & R_{32}^c & R_{33}^c \end{bmatrix}$$

La translation décrit quant à elle les positions relatives des origines des deux repères.

$$T^c = (T_x^c, T_y^c, T_z^c)$$

On peut donc exprimer un point 3D de la scène P_s dans le repère caméra P_c :

$$P_c = R^c P_s + T^c$$

2. Paramètres de la caméra pour la stéréovision

1. Paramètres extrinsèques

- Changement du repère de la scène vers le repère de la caméra
- Équation

$$\mathbf{P}_c = \mathbf{R}^c \mathbf{P}_s + \mathbf{T}^c$$

$$X_c = R_{11}^c X_s + R_{12}^c Y_s + R_{13}^c Z_s + T_x^c$$

$$Y_c = R_{21}^c X_s + R_{22}^c Y_s + R_{23}^c Z_s + T_y^c$$

$$Z_c = R_{31}^c X_s + R_{32}^c Y_s + R_{33}^c Z_s + T_z^c$$

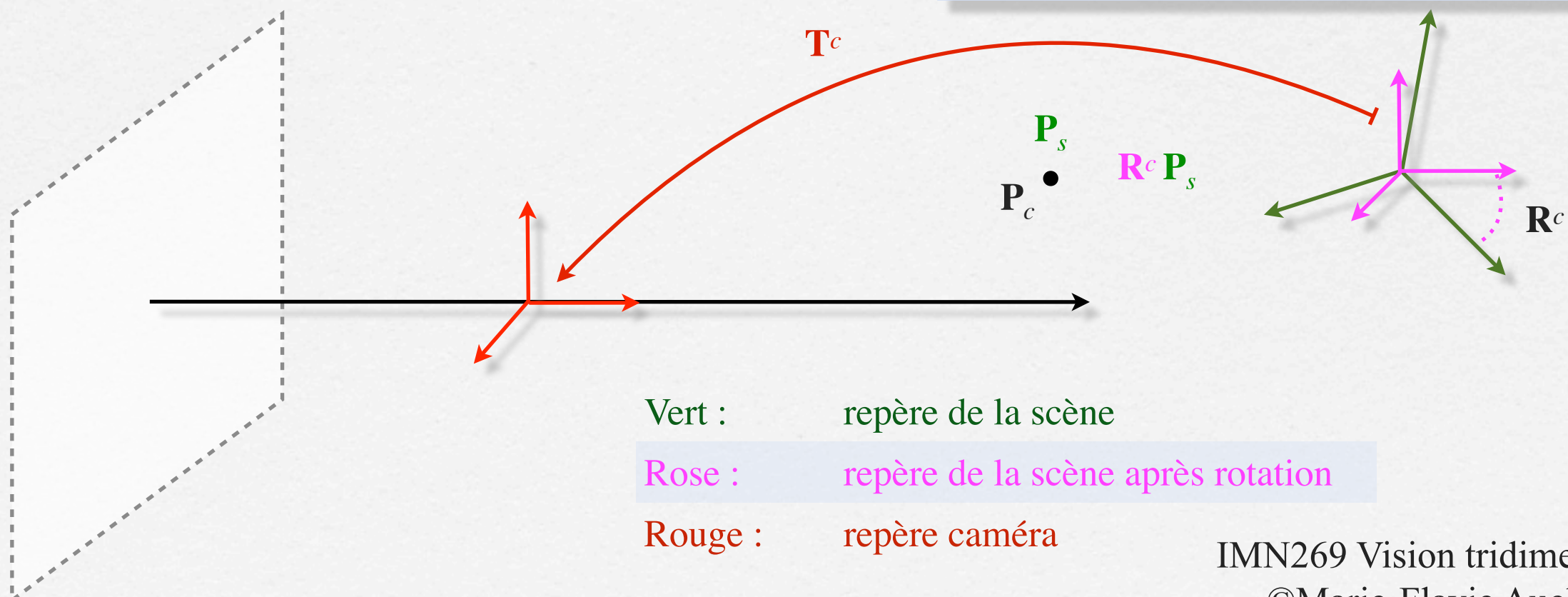
Remarques

- C'est toujours le même point « physique » qu'on exprime selon un repère différent
- Il existe d'autres formulations

→ Exemple

$$\mathbf{P}_s = \mathbf{R}^c \mathbf{P}_c - \mathbf{T}^c$$

- ☑ il faut toujours vérifier le modèle de caméra avant d'utiliser les équations



Plan du chapitre

1. Rappels de formation d'image pour la stéréovision

2. Paramètres de la caméra pour la stéréovision

2.1. Paramètres extrinsèques

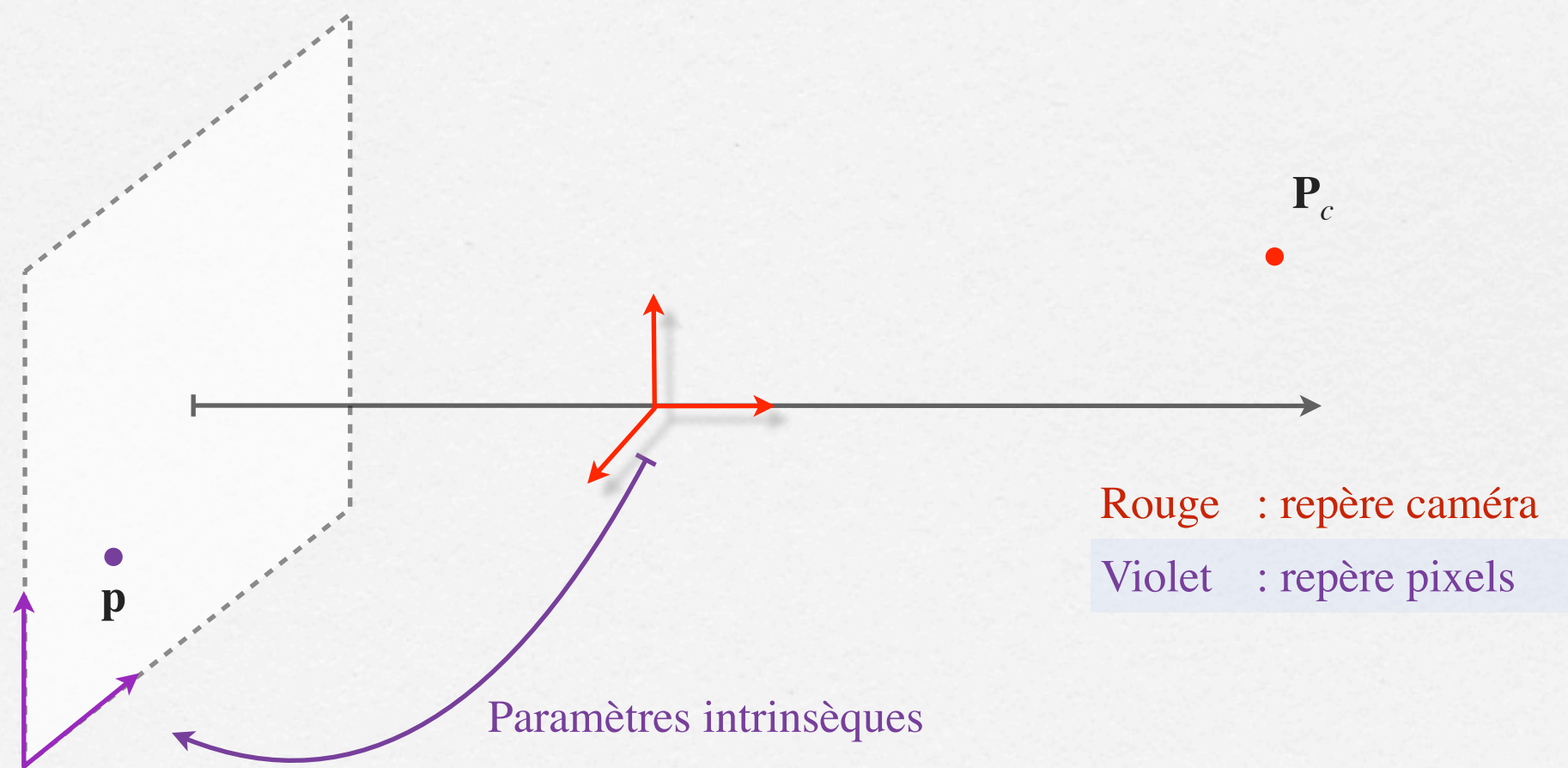
2.2. Paramètres intrinsèques

Les paramètres intrinsèques permettent de caractériser les propriétés optiques, géométriques et numériques de la caméra.

2. Paramètres de la caméra pour la stéréovision

1. Paramètres intrinsèques

- Aspects internes de la caméra : géométrique, optique et numériques
- Liens entre les coordonnées d'un point de la scène dans le repère caméra et les coordonnées en pixels de sa projection dans l'image



2. Paramètres de la caméra pour la stéréovision

1. Paramètres intrinsèques

a) Distance du plan image

- Modèle de la caméra à sténopée
- Projection perspective

✓ Rappel des équations :

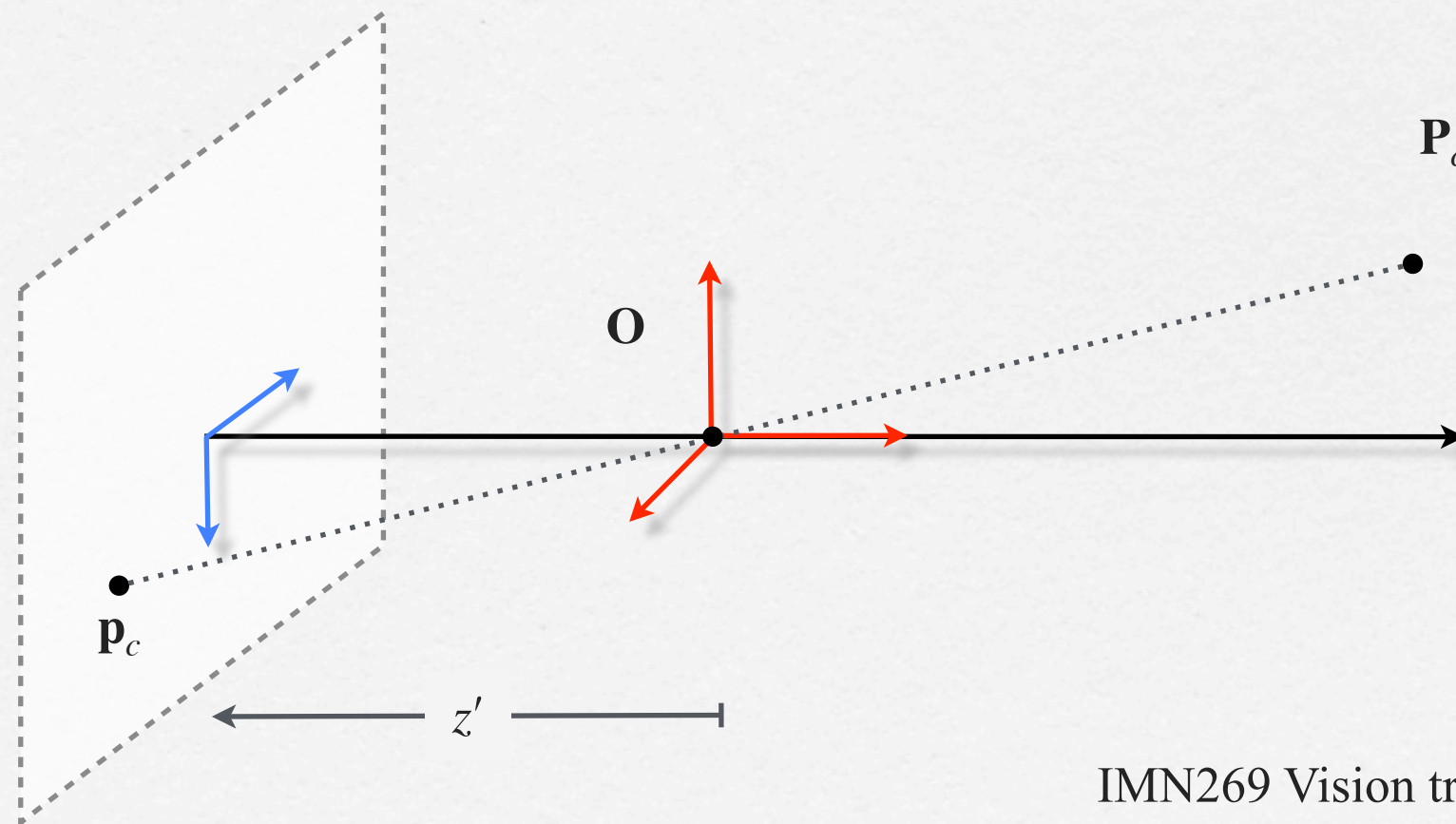
$$x_c = \left(\frac{z'}{Z_c} \right) X_c$$

$$y_c = \left(\frac{z'}{Z_c} \right) Y_c$$

Remarque

- Parfois utile de considérer le plan image dans un environnement 3D

$$\rightarrow z_c = \left(\frac{z'}{Z_c} \right) Z_c = z'$$



2. Paramètres de la caméra pour la stéréovision

1. Paramètres intrinsèques

a) Coefficients de distorsion

- Distorsions radiales introduites par la lentille

✓ *Rappel des équations*

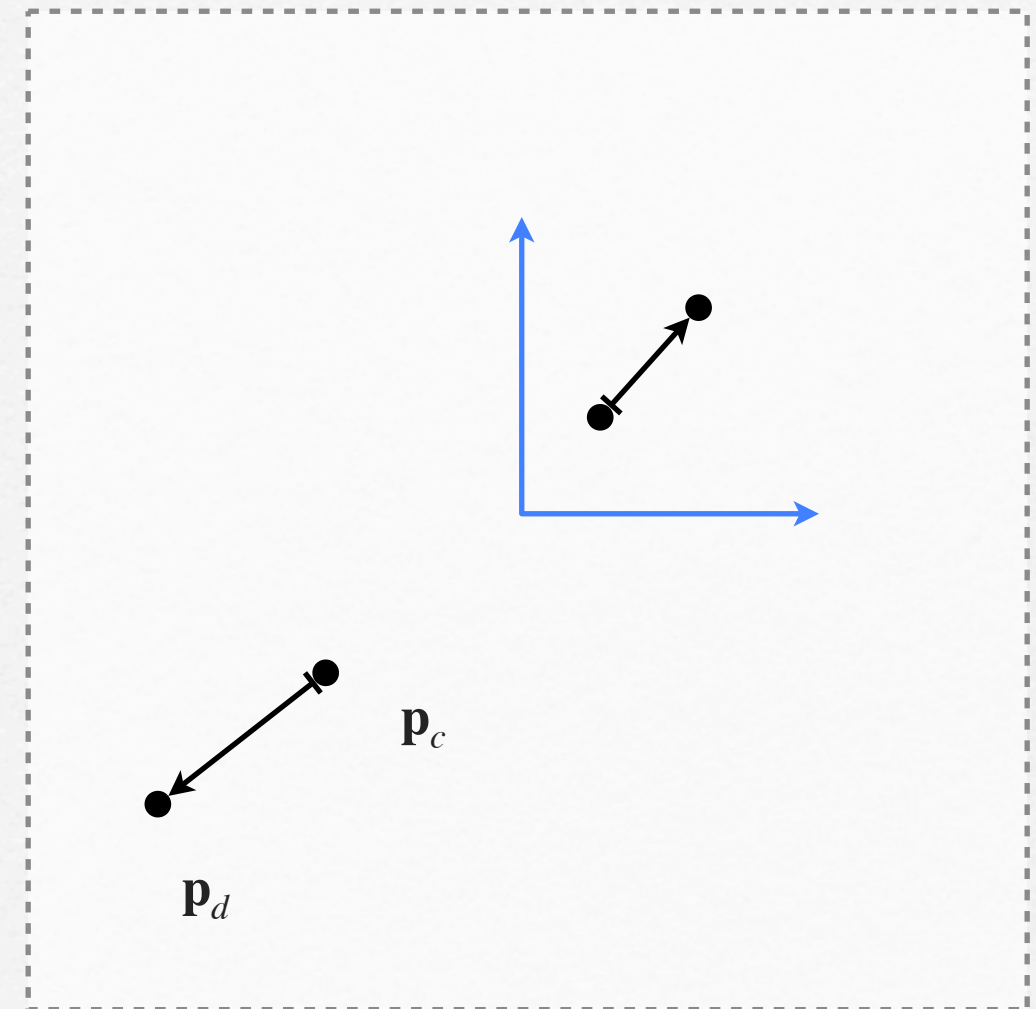
$$x_d = x_c (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4)$$

$$y_d = y_c (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4)$$

$$\text{avec } r^2 = x_c^2 + y_c^2$$

Remarques

- ✓ Si la distorsion est petite, on l'ignore
- ✓ Si le CCD $< 500 \times 500$, on peut considérer $k_2 = 0$
- ✓ $z_d = z'$ (pas de distorsion en Z)



2. Paramètres de la caméra pour la stéréovision

1. Paramètres intrinsèques

a) Coefficients de distorsion

- On peut aussi considérer l'équation sous cette forme :

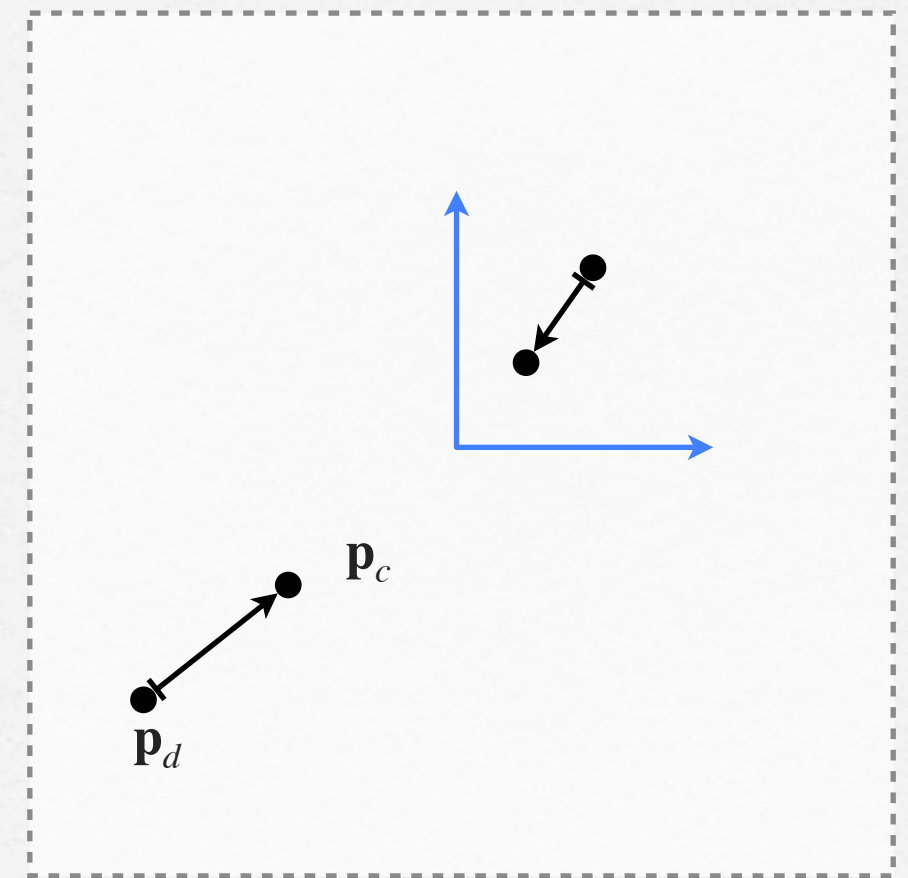
$$x_c = x_d (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4)$$

$$y_c = y_d (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4)$$

$$\text{avec } r^2 = x_d^2 + y_d^2$$

ATTENTION

- il est évident que les valeurs de k_1 et k_2 seront différents de ceux de la page précédente !



2. Paramètres de la caméra pour la stéréovision

1. Paramètres intrinsèques

c) Format du pixel

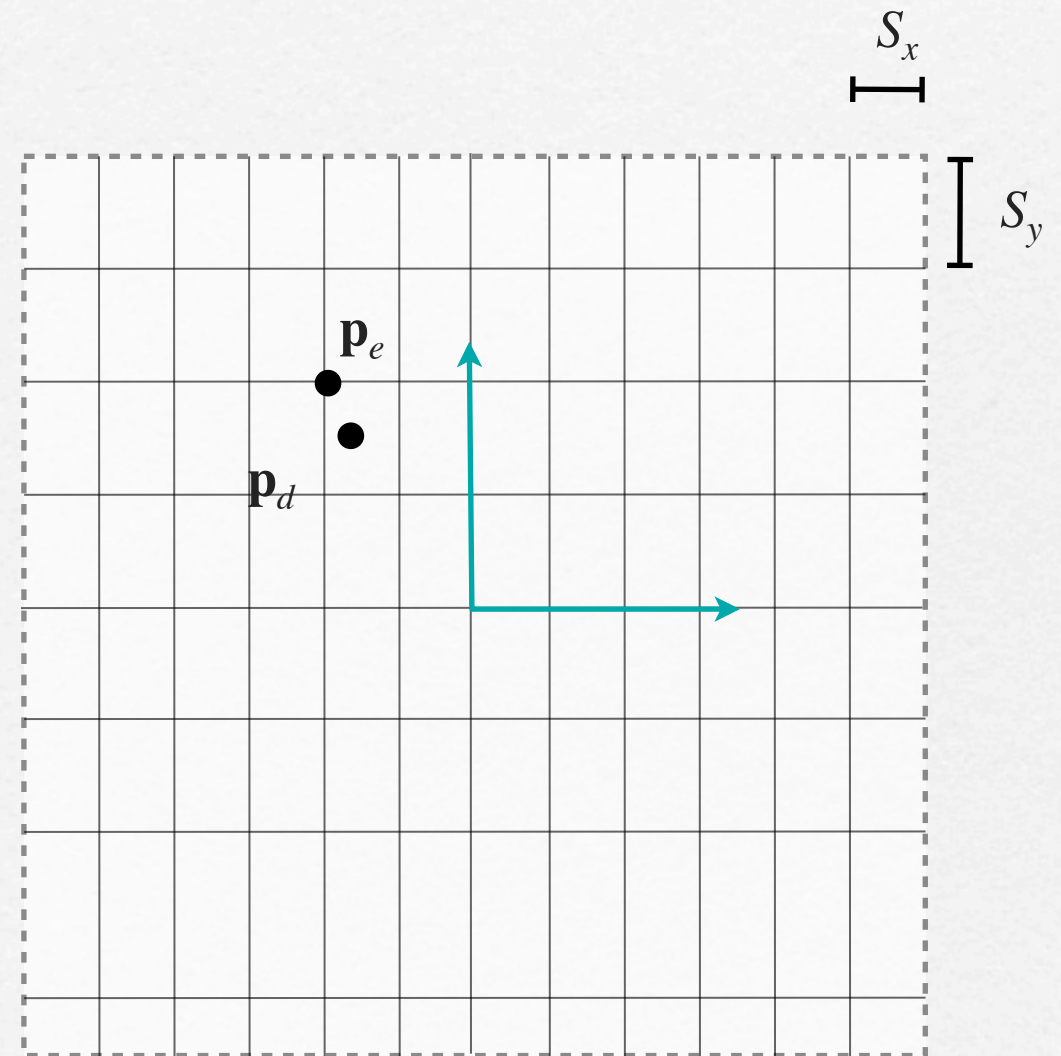
■ Passage au discret

✓ Rappel des équations

$$m_e = \left\lfloor \frac{x_d}{S_x} + 0.5 \right\rfloor$$

$$n_e = \left\lfloor \frac{y_d}{S_y} + 0.5 \right\rfloor$$

avec $\lfloor \cdot \rfloor$ est l'opération plancher
(seuil, plus grand entier inférieur)



2. Paramètres de la caméra pour la stéréovision

1. Paramètres intrinsèques

d) Position de l'axe optique

■ Conformité avec le standard de codage des images

✓ repère en haut et à gauche

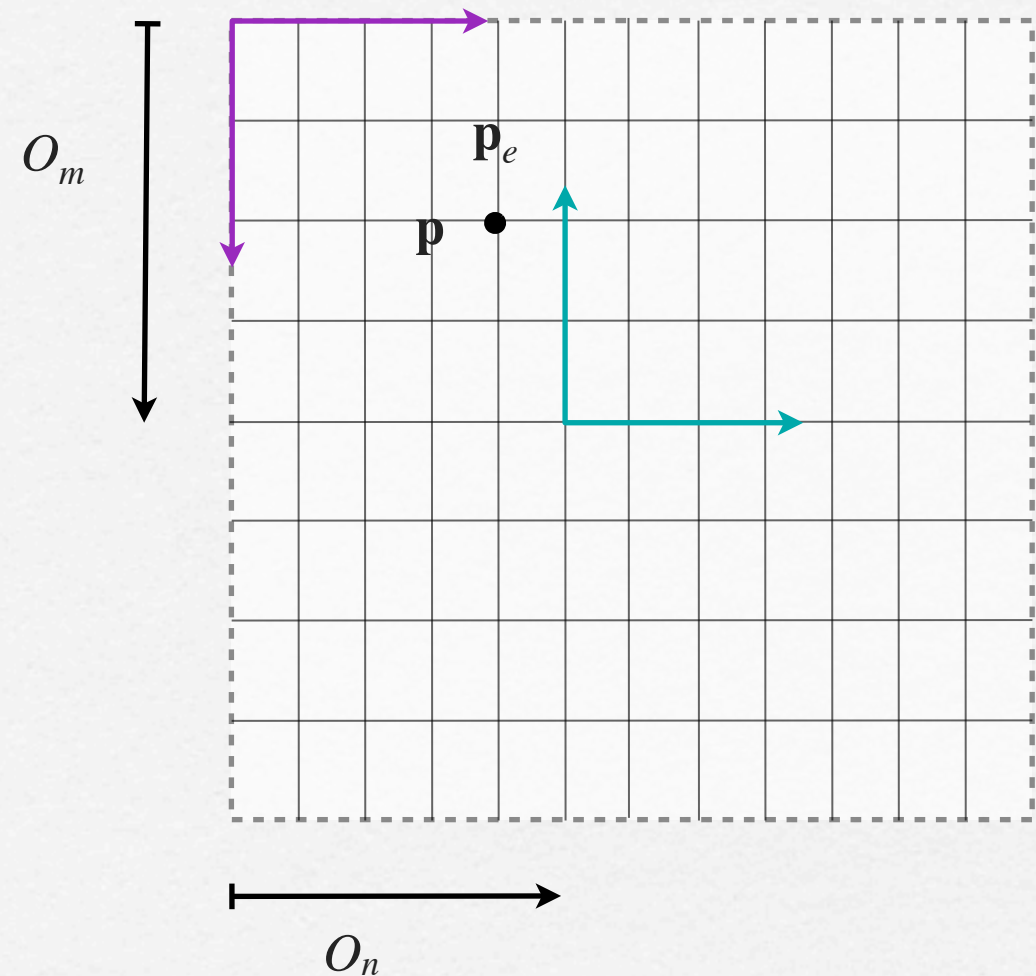
✓ pas de négatifs

✓ inversion de l'axe y

→ Rappel des équations

$$m = m_e + O_m$$

$$n = -n_e + O_n$$



Récapitulatif

→ Paramètres extrinsèques : Position et orientation de la caméra

1. Rotation, matrice 3×3 : \mathbf{R}^c

✓ Liés à la projection

2. Translation, vecteur 3×1 : \mathbf{T}^c

✓ Liés à la projection

$$m = \left[\left(\frac{z'}{S_x} \right) \left(\frac{R_{11}^c X_s + R_{12}^c Y_s + R_{13}^c Z_s + T_x^c}{R_{31}^c X_s + R_{32}^c Y_s + R_{33}^c Z_s + T_z^c} \right) (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) + 0.5 \right] + O_m \quad (2.1)$$

$$n = - \left[\left(\frac{z'}{S_y} \right) \left(\frac{R_{21}^c X_s + R_{22}^c Y_s + R_{23}^c Z_s + T_y^c}{R_{31}^c X_s + R_{32}^c Y_s + R_{33}^c Z_s + T_z^c} \right) (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) + 0.5 \right] + O_n$$

→ Paramètres intrinsèques : Aspects internes de la caméra

3. Distance du plan CCD : z'

✓ Lié à la projection

4. Déformation : k_1 et k_2

✓ Lié à l'optique

5. Échantillonnage : S_x et S_y

✓ Lié à la numérisation

6. Position de l'axe optique : O_m et O_n

✓ Lié à la numérisation

Récapitulatif

Remarques

- Les autres phénomènes vus dans le cours d'acquisition des médias numériques ne sont souvent pas considérés pour la stéréovision pure
 - ☑ Ils seront rappelés au besoin dans le survol des autres approches
 - ➡ « *Shape from X* »
- Les autres distorsions vues dans le cours d'acquisition des médias numériques n'affectent pas la position du point projeté dans l'image mais plutôt sa netteté

Références

Pour en savoir plus ...

- ➔ **L.G. Shapiro and G.C. Stockman**
Computer Vision, Prentice Hall, 2001
- ➔ **R.C. Gonzalez and R.E. Woods**
Digital Image Processing, Addison Wesley, 2002.
- ➔ **E. Trucco et A. Verri**
Introductory Techniques for 3-D Computer Vision, Prentice Hall, 1998.
- ➔ **E. Dereniak et T. Dereniak**
Geometrical and Trigonometric Optics, Cambridge University Press, 2008.
- ➔ **B. Cyganek et J. Siebert**
An Introduction to 3D Computer Vision Techniques and Algorithms. John Wiley & Sons, 2009.
- ➔ **R. Horaud et O. Monga**
Vision par ordinateur : outils fondamentaux. Traité des nouvelles technologies. Série informatique. Hermes, Paris, France, 2e édition, 1995.
- ➔ **C. Steger, M. Ulrich et C. Wiedemann**
Machine Vision Algorithms and Applications. Textbook. John Wiley and Sons, Germany, 2008
- ➔ **M.F. Auclair-Fortier**
Notes du cours IMN117-Acquisition des médias numériques