

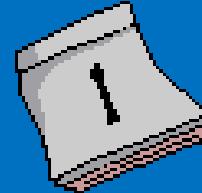
3ème Année IDSD-ID

# Vision par ordinateur

**Sonda Ammar**

**[sonda.ammar@enetcom.usf.tn](mailto:sonda.ammar@enetcom.usf.tn)**

# **Chapitre**



**Introduction  
à la vision par ordinateur**

# PLAN

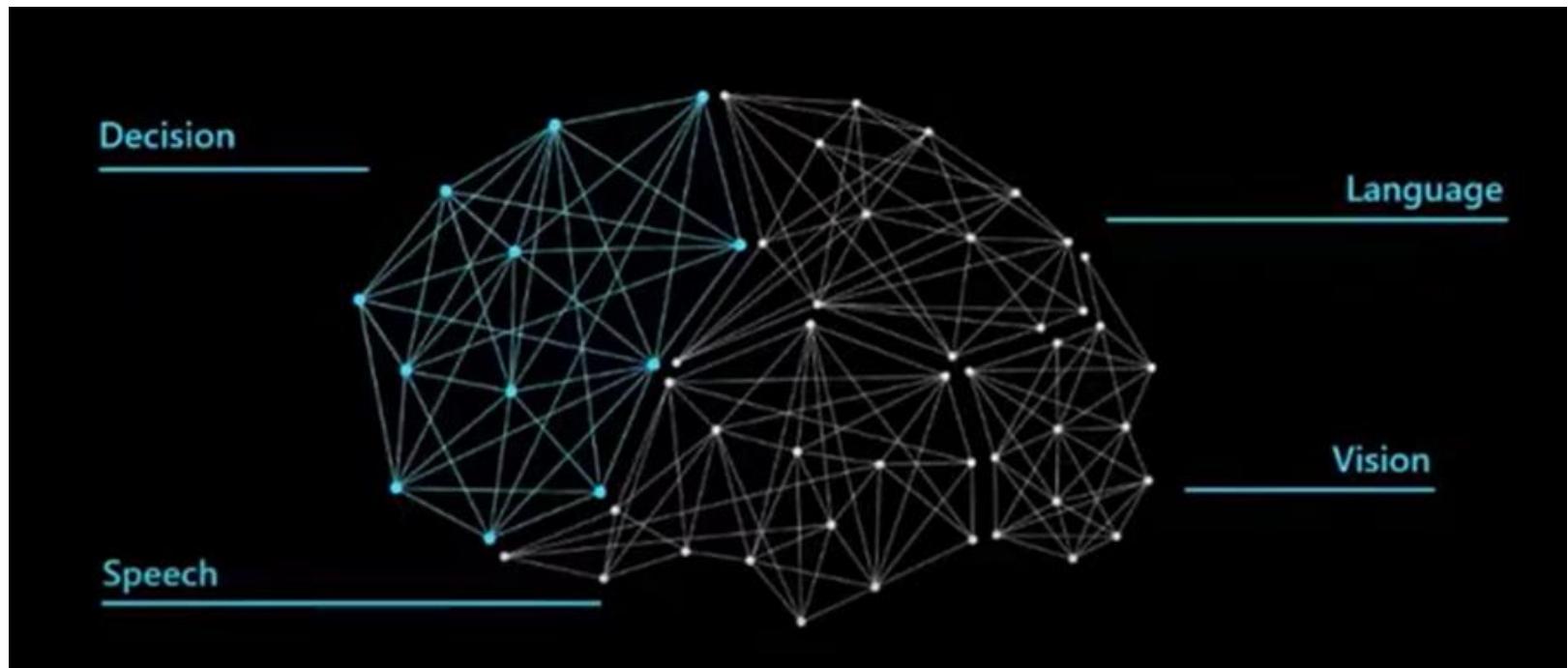
- ◆ **La vision par ordinateur ?**
- ◆ **Imitation de l'intelligence humaine par la vision par ordinateur**
- ◆ **La vision par ordinateur vs. Vision biologique**
- ◆ **Voir avec ses yeux...ou le cerveau ?**
- ◆ **La vision par ordinateur vs. Traitement d'images**
- ◆ **La vision par ordinateur vs. l'apprentissage automatique**
- ◆ **Applications**
- ◆ **Challenges**

# La vision par ordinateur ?



# La vision par ordinateur ?

❖ La Computer Vision ou vision par ordinateur est une technologie d'intelligence artificielle permettant aux ordinateurs de « voir » de la même façon que les êtres humains.



# La vision par ordinateur ?

- ❖ Un aspect du domaine de l'IA.
- ❖ L'IA a été caractérisée par John McCarthy qui est l'un des pionniers comme une tentative de trouver comment faire en sorte que les machines utilisent des abstractions de forme, de langage et des concepts qui résolvent le type de problème désormais réservés aux humains et les améliorent
- ❖ Inclut la perception visuelle de l'environnement

# Imitation de l'intelligence humaine par la vision par ordinateur

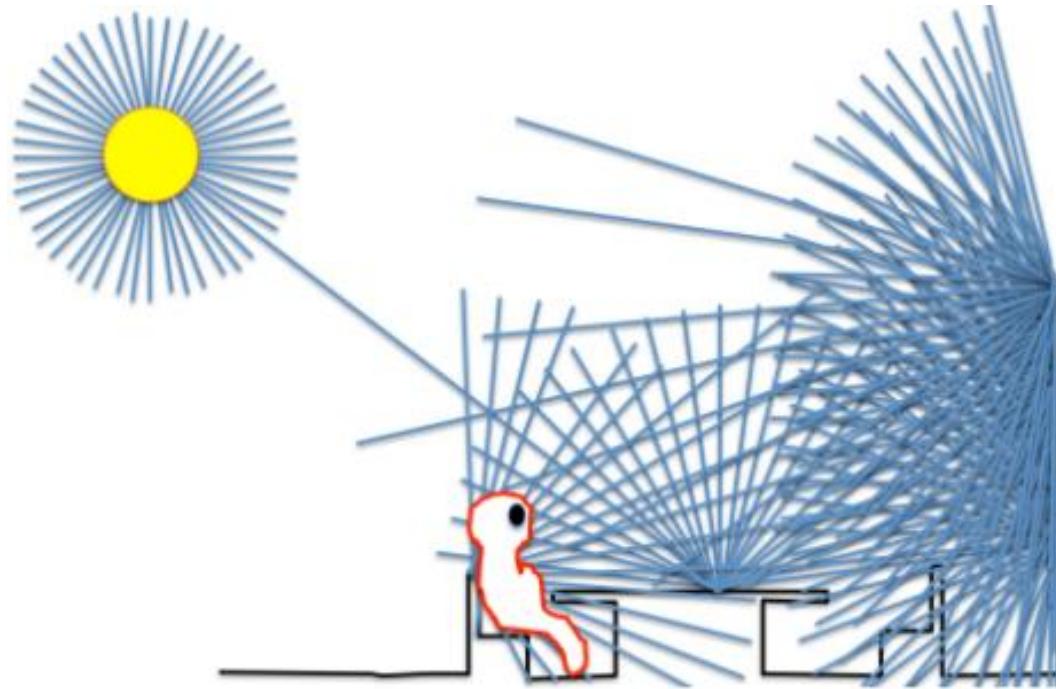
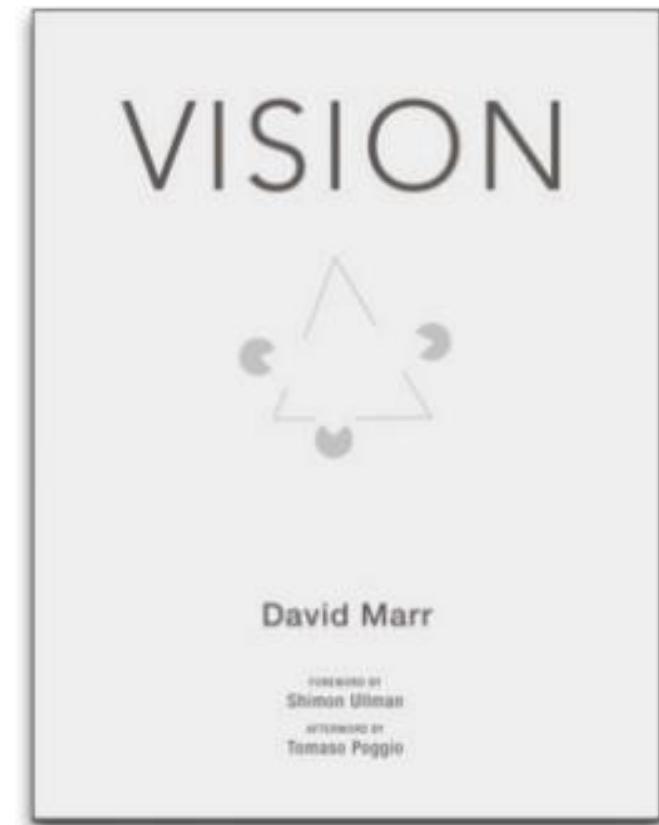


Image Credits: [Antonio Torralba](#)

- ◆ L'objectif de la vision par ordinateur est de convertir la lumière en sens

# **Imitation de l'intelligence humaine par la vision par ordinateur**

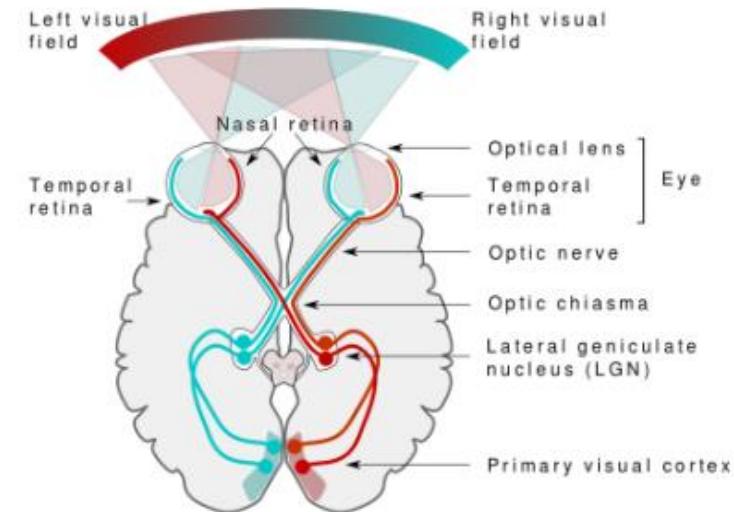
- ◆ **qu'est-ce que ça veut dire, voir?  
la réponse de l'homme ordinaire  
serait de savoir ce qui est où en  
regardant**
- ◆ **Découvrir à partir d'images ce  
qui est présent dans le monde,  
où sont les choses, quelles  
actions se déroulent, prévoir et  
anticiper les événements dans le  
monde**



**Source**

# La vision par ordinateur vs. Vision biologique

- ❖ Nombreux algorithmes de vision par ordinateur s'inspirent de la vision biologique et la vision biologique sert de motivation pour développer des algorithmes de vision par ordinateur.
- ❖ plus de 50% du traitement dans le cerveau humain est dédié à l'information visuelle



# Voir avec ses yeux...ou le cerveau ?



VOIR AVEC SES YEUX... OU LE CERVEAU ?

Unité Fonctionnelle Vision et Cognition, le magazine de la santé (13/03/2018)

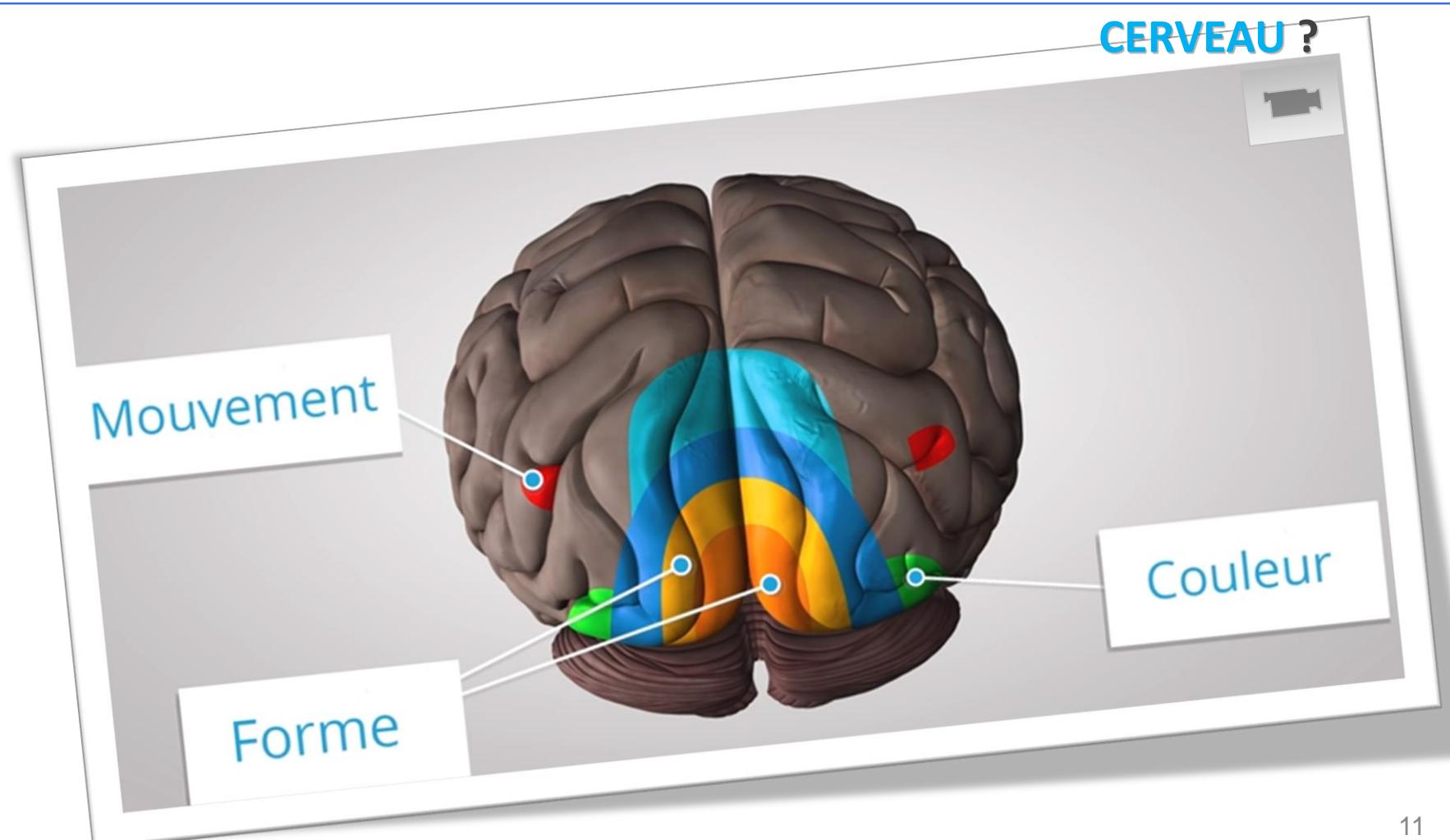
**Le magazine de la santé (13/03/2018)**

**Sylvie Chokron, Neuropsychologue,**

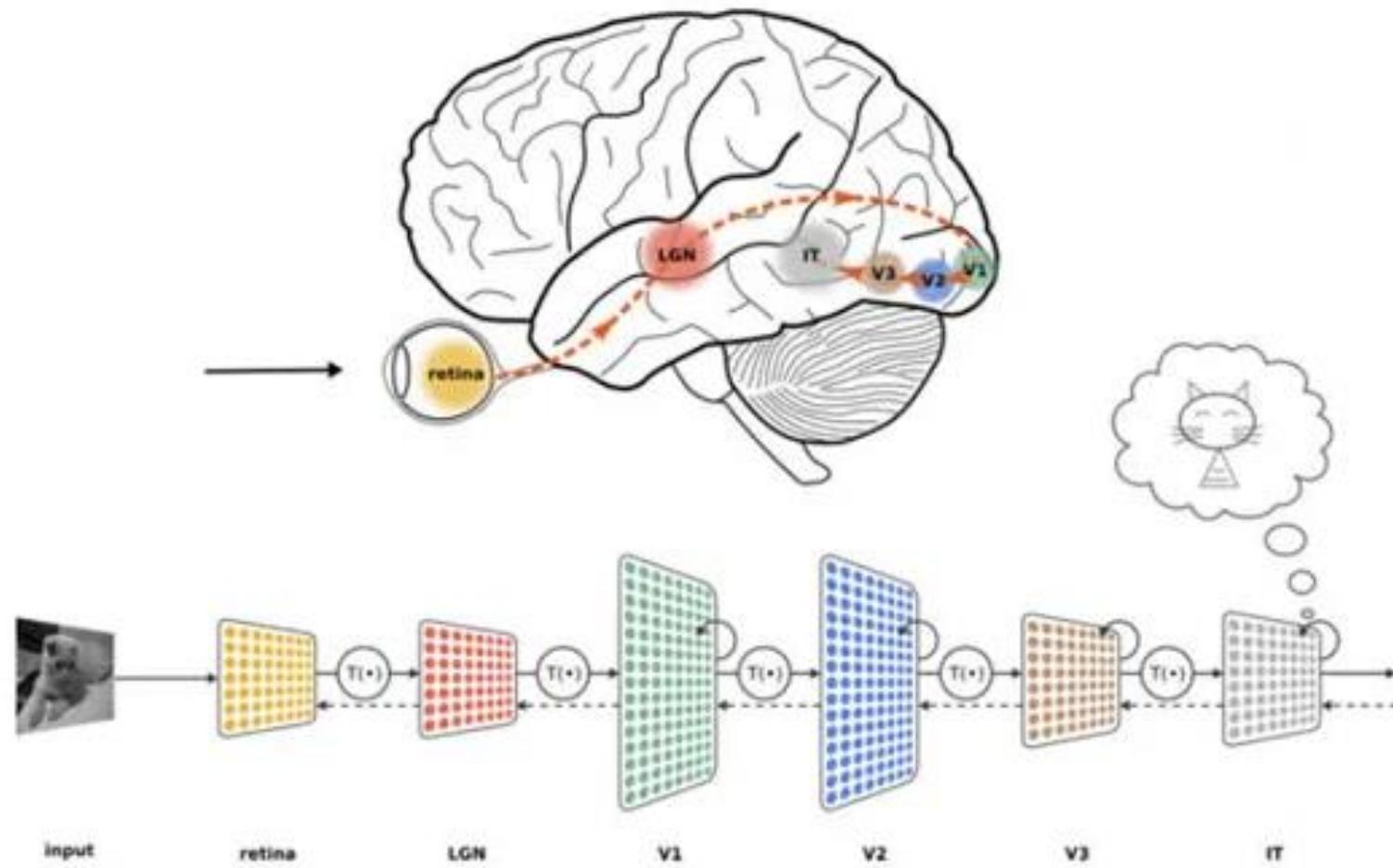
**Unité Fonctionnelle Vision et Cognition**

# Voir avec ses yeux...ou le cerveau ?

Voir avec ses YEUX...ou le  
CERVEAU ?



# Imitation de l'intelligence humaine par la vision par ordinateur



# La vision par ordinateur vs. Traitement d'images

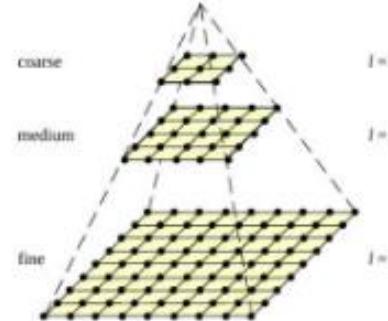
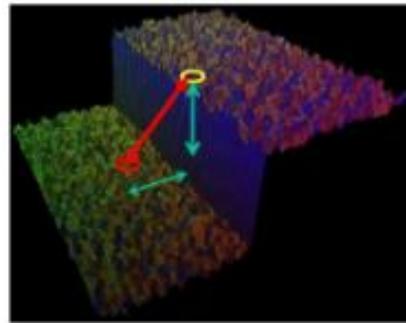
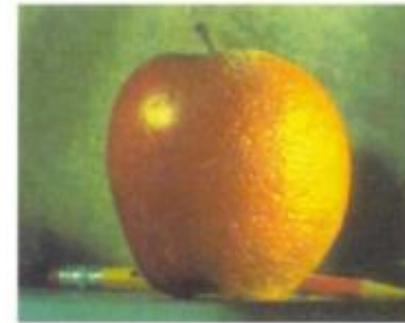
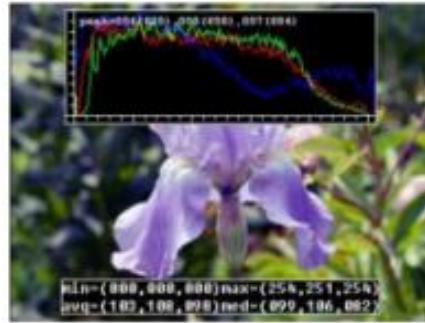


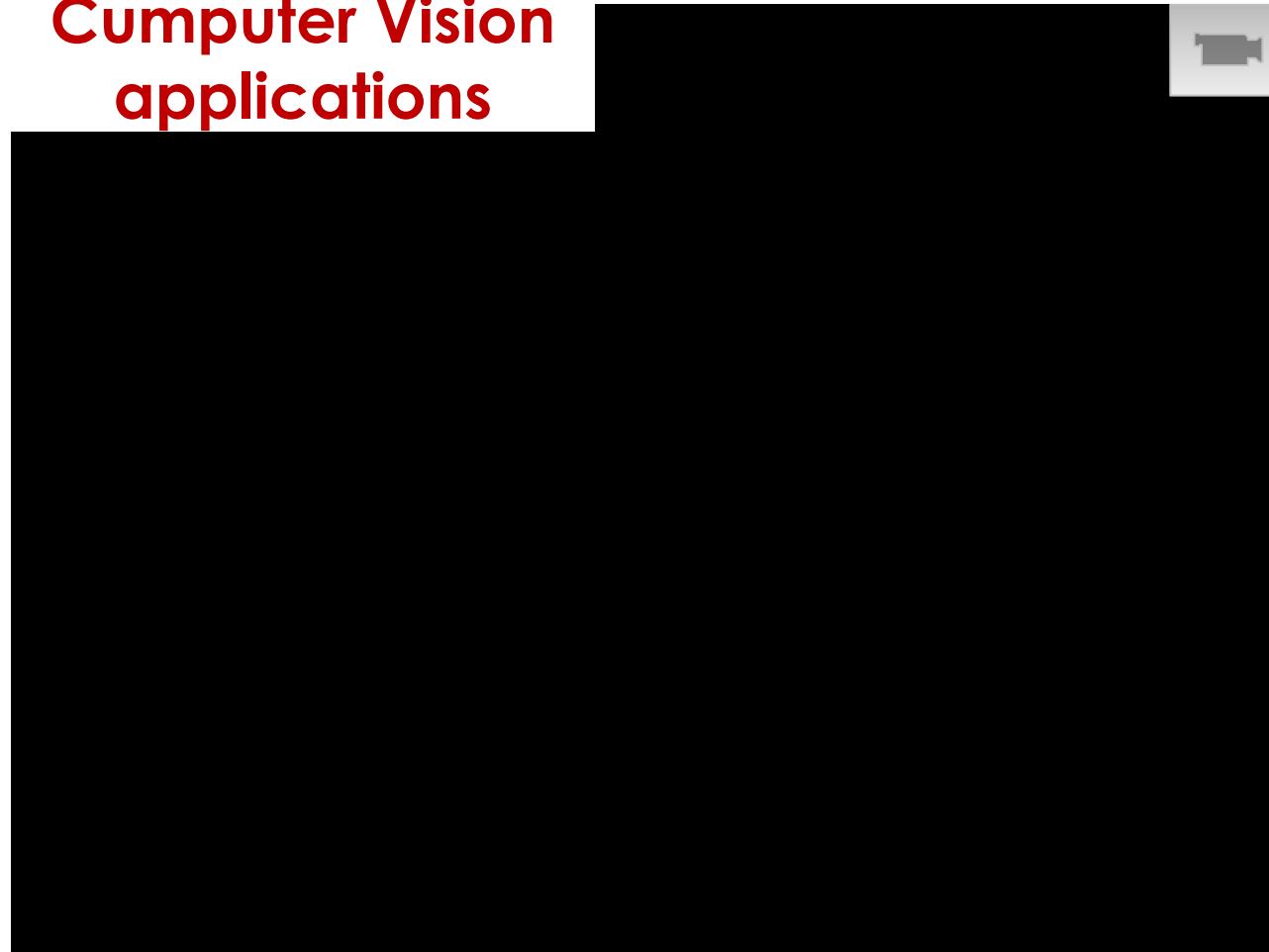
Image Credits: [Richard Szeliski](#)

# La vision par ordinateur vs. l'apprentissage automatique (ML)



Deng Dong, Socher, Li, Li and Li, ImageNet A large-scale hierarchical image database, CVPR, 2009

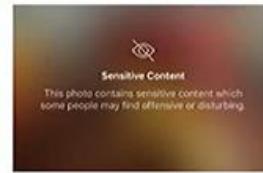
## Computer Vision applications



# Applications de la vision par ordinateur



# Applications de la vision par ordinateur



Aerial inspections

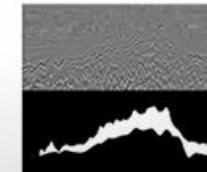
Manufacturing defect detection

Document processing

Content management

Product discovery

Content moderation



Damage assessment

Agricultural crop/pest analysis

Environmental conservation

Warehouse automation

Medical Imaging analysis

Geologic analysis

# **Applications de la vision par ordinateur**

◆ De nombreuses applications que vous utilisez quotidiennement utilisent la technologie de vision par ordinateur.



◆ Google utilise la vision par ordinateur pour rechercher des objets et des scènes: "chien" ou "coucher de soleil", dans votre bibliothèque d'images.

# Applications de la vision par ordinateur



Apple, Samsung utilisent des algorithmes de reconnaissance faciale pour déverrouiller les smartphones.



Facebook utilise la reconnaissance faciale pour détecter les utilisateurs sur les photos que vous publiez en ligne.

# Applications de la vision par ordinateur



## Amazon Go : magasins sans caissier

En 2016, Amazon a lancé **Go**, un magasin où vous pouvez **entrer, ramasser** les articles que vous voulez acheter et **sortir**.

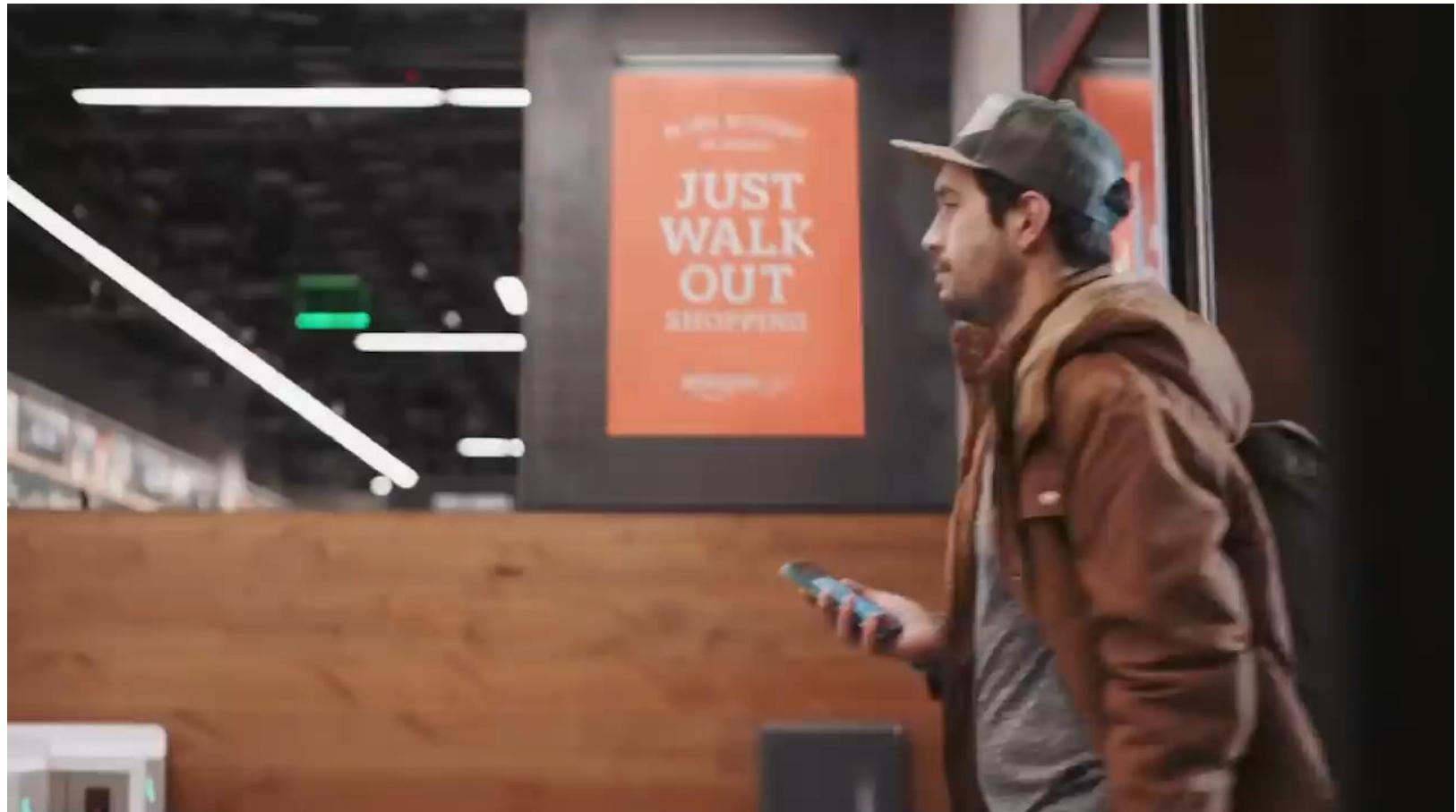
**PAS** besoin de caissiers. « Au fur et à mesure que les clients se déplacent dans le magasin, des caméras équipées d'algorithmes avancés de vision par ordinateur surveillent leur comportement et gardent une trace des articles qu'ils prennent ou retournent dans les rayons.

Lorsqu'ils quittent le magasin, leur panier est automatiquement débité de leur compte Amazon.

**Trois ans après l'annonce, Amazon a ouvert 18 magasins Go et c'est toujours un travail en cours.**

# Applications de la vision par ordinateur

Amazon Go : magasins sans caissier



# Applications de la vision par ordinateur

## ❖ Automatisation des inspections visuelles dans les secteurs de l'énergie et de la fabrication grâce à l'IA



# Applications de la vision par ordinateur

❖ Automatisation des inspections visuelles dans les secteurs de l'énergie et de la fabrication grâce à l'IA



# Applications de la vision par ordinateur



L'USINE DIGITALE

Intelligence artificielle Mobilité Cybersécurité IOT Plus ▾

ACCUEIL · INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

## Paige lève 45 millions de dollars pour détecter le cancer grâce à la vision par ordinateur

**LÉVÉE DE FONDS** Paige s'est spécialisée dans la vision par ordinateur pour détecter le cancer. Pour accélérer le développement de ses outils et leur commercialisation, cette start-up américaine a levé 45 millions de dollars. Elle souhaite désormais exporter son expertise au Canada, au Brésil et en Europe.

ALICE VITARD | PUBLIÉ LE 19 DÉCEMBRE 2019 À 10H12  
E-SANTÉ. INTELLIGENCE ARTIFICIELLE. COMPUTER VISION



L'USINE DIGITALE

Intelligence artificielle Mobilité Cybersécurité IOT Plus ▾

ACCUEIL · COMPUTER VISION

## Un trimaran autonome prévoit de traverser l'Atlantique en 2022

Le Mayflower, un trimaran sans capitaine ni équipage, s'attaquera à la traversée de l'Atlantique au printemps prochain. Sa mission : la recherche scientifique.

RAPHAËLÉ KARAYAN | PUBLIÉ LE 01 DÉCEMBRE 2021 À 16H55  
VÉHICULE AUTONOME. RECHERCHE. IBM

Le bateau est équipé de six caméras reliées à un système de [vision par ordinateur](#), de 30 capteurs (radar, GPS, contrôle d'altitude, détection de la profondeur du fond, accéléromètre...) et de 15 ordinateurs monocartes Raspberry Pi.

Sonda Ammar



L'USINE DIGITALE

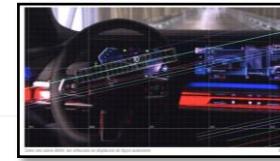
Intelligence artificielle Mobilité Cybersécurité IOT Plus ▾

ACCUEIL · SANTÉ

## OphtAI utilise l'IA pour dépister les maladies oculaires des personnes diabétiques

La joint-venture française OphtAI commercialise un logiciel qui dépiste la rétinopathie diabétique, une maladie qui rend aveugle les personnes diabétiques. Elle vient de gagner le prix de l'innovation lors du 12e Congrès de la Société Française de Santé Digitale.

ALICE VITARD | PUBLIÉ LE 18 DÉCEMBRE 2019 À 09H47  
SANTÉ. INTELLIGENCE ARTIFICIELLE. COMPUTER VISION



L'USINE DIGITALE

Intelligence artificielle Mobilité Cybersécurité IOT Plus ▾

ACCUEIL · INDUSTRIE 4.0

## Dans une usine BMW, les véhicules se déplacent de façon autonome

**VÉO** Des véhicules non autonomes qui se déplacent de manière autonome... BMW s'est rapproché de deux start-up, Seoul Robotics et Embotech, pour automatiser le déplacement de ses voitures sur son site de Dingolfing en Allemagne.

LENÀ COROT | PUBLIÉ LE 25 JUILLET 2022 À 14H01  
VÉHICULE AUTONOME. BMW. INDUSTRIE 4.0

# Applications de la vision par ordinateur



## L'USINE DIGITALE

Intelligence artificielle Mobilité Cybersécurité IOT Plus ▾

ACCUEIL > SANTE

### Theator lève 39,5 millions de dollars pour analyser les vidéos de chirurgie

**LEVÉE DE FONDS** Theator exploite l'intelligence artificielle et des technologies de vision par ordinateur pour générer des informations exploitables visant à améliorer les opérations chirurgicales. La start-up lève 39,5 millions de dollars pour poursuivre le développement de sa plateforme.

LÉNA COROT | PUBLIÉ LE 26 JUILLET 2022 À 11H45

SANTÉ, COMPUTER VISION, INTELLIGENCE ARTIFICIELLE



## L'USINE DIGITALE

Intelligence artificielle Mobilité Cybersécurité IOT Plus ▾

ACCUEIL > SPORT

### L'IA au secours de l'arbitrage du hors-jeu lors de la prochaine Coupe du monde de football ?

Pour la première fois, une technologie de détection semi-automatique du hors-jeu va être testée en compétition, lors de la Coupe arabe au Qatar. Si le résultat est satisfaisant, elle sera mise en place lors du Mondial 2022.

RAPHAËLLE KARAYAN | PUBLIÉ LE 29 NOVEMBRE 2021 À 16H45

### 10 CAMÉRAS POUR ASSISTER L'ARBITRAGE

La technologie, basée sur l'intelligence artificielle, est développée par Hawk-Eye, une société du groupe [Sony](#) qui conçoit des solutions de computer vision pour le sport. Elle est déjà opérationnelle dans le championnat chinois de football.

Sonda Ammar



## L'USINE DIGITALE

Intelligence artificielle Mobilité Cybersécurité IOT Plus ▾

ACCUEIL > INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

### La start-up XXII mise sur les pompiers pour entraîner ses algorithmes à détecter des feux

La start-up XXII, qui édite un logiciel d'analyse vidéo en temps réel, s'est rapprochée du service départemental d'incendie et de secours (SDIS) de la Meuse. L'objectif : entraîner son algorithme à reconnaître en conditions réelles des départs de feu sur des voitures. La start-up souhaite ainsi valider et améliorer cette nouvelle fonctionnalité pour ensuite la commercialiser dès septembre.

LÉNA COROT | PUBLIÉ LE 30 MAI 2022 À 11H35

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE, START-UP, COMPUTER VISION



## L'USINE DIGITALE

Intelligence artificielle Mobilité Cybersécurité IOT Plus ▾

ACCUEIL > ROBOTIQUE

### Xiaomi présente CyberOne, un robot humanoïde

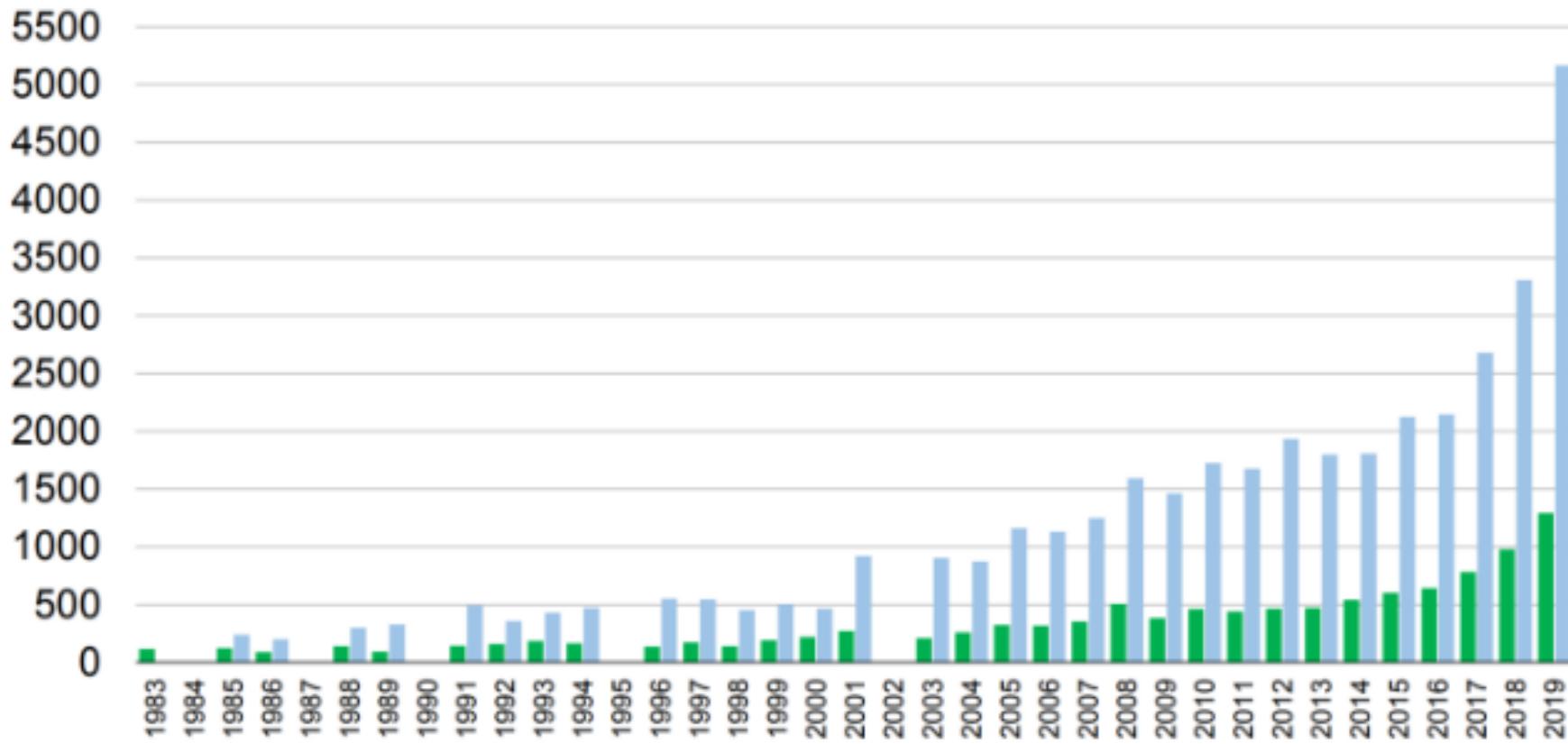
**VIDÉO** Un an après avoir dévoilé un "robot chien", le fabricant d'électronique chinois Xiaomi a fait la démonstration d'un robot bipède capable, affirme-t-il, de décrypter les émotions humaines.

RAPHAËLLE KARAYAN | PUBLIÉ LE 12 AOÛT 2022 À 11H22

ROBOTIQUE, XIAOMI, ELECTRONIQUE

**"Son programme de vision lui permet de percevoir l'espace en trois dimensions, de reconnaître les individus, les gestes et les expressions", affirme Xiaomi.**

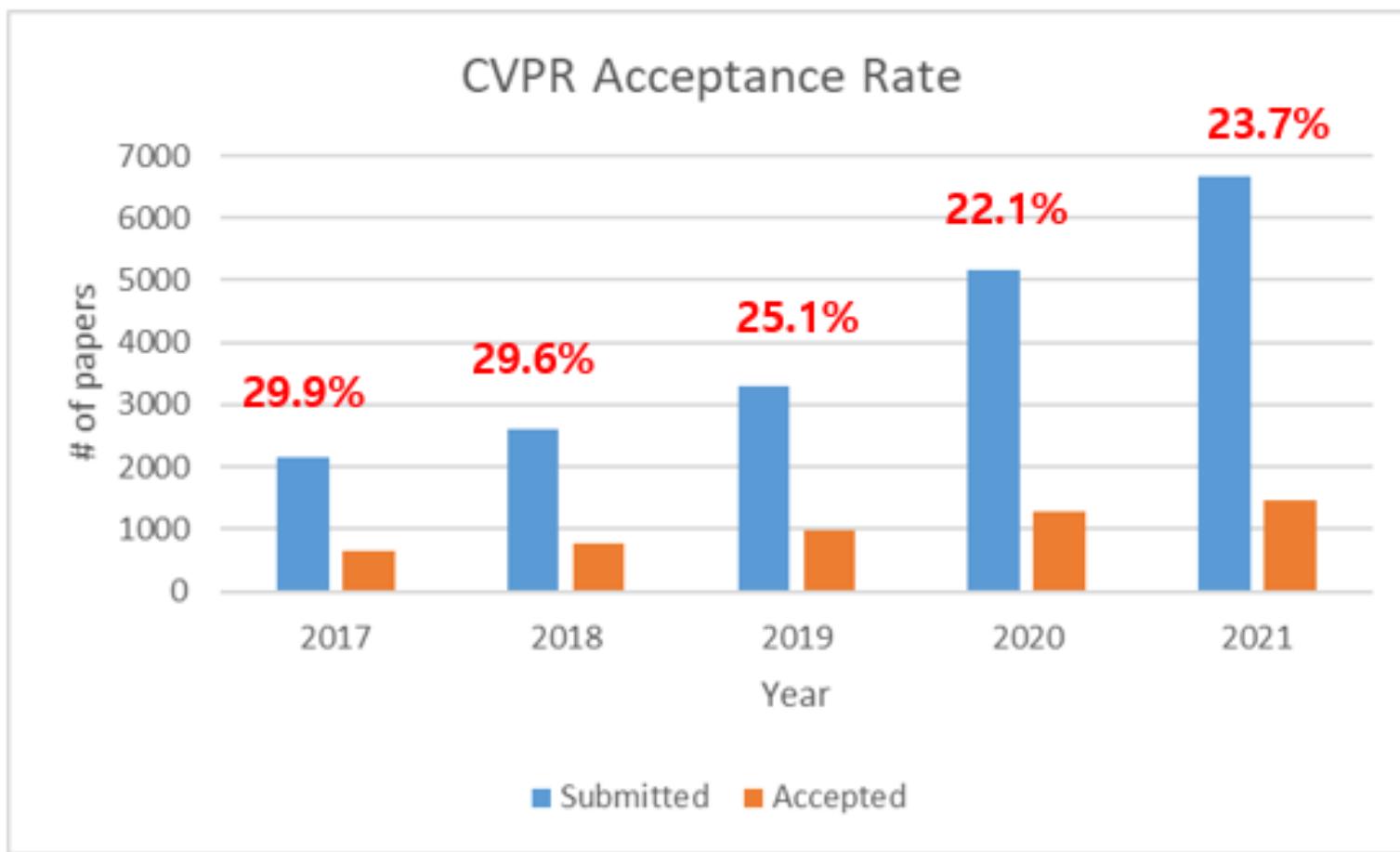
# CVPR Submitted and Accepted Papers



Slide Credit: [CVPR 2019 Welcome Slides](#)

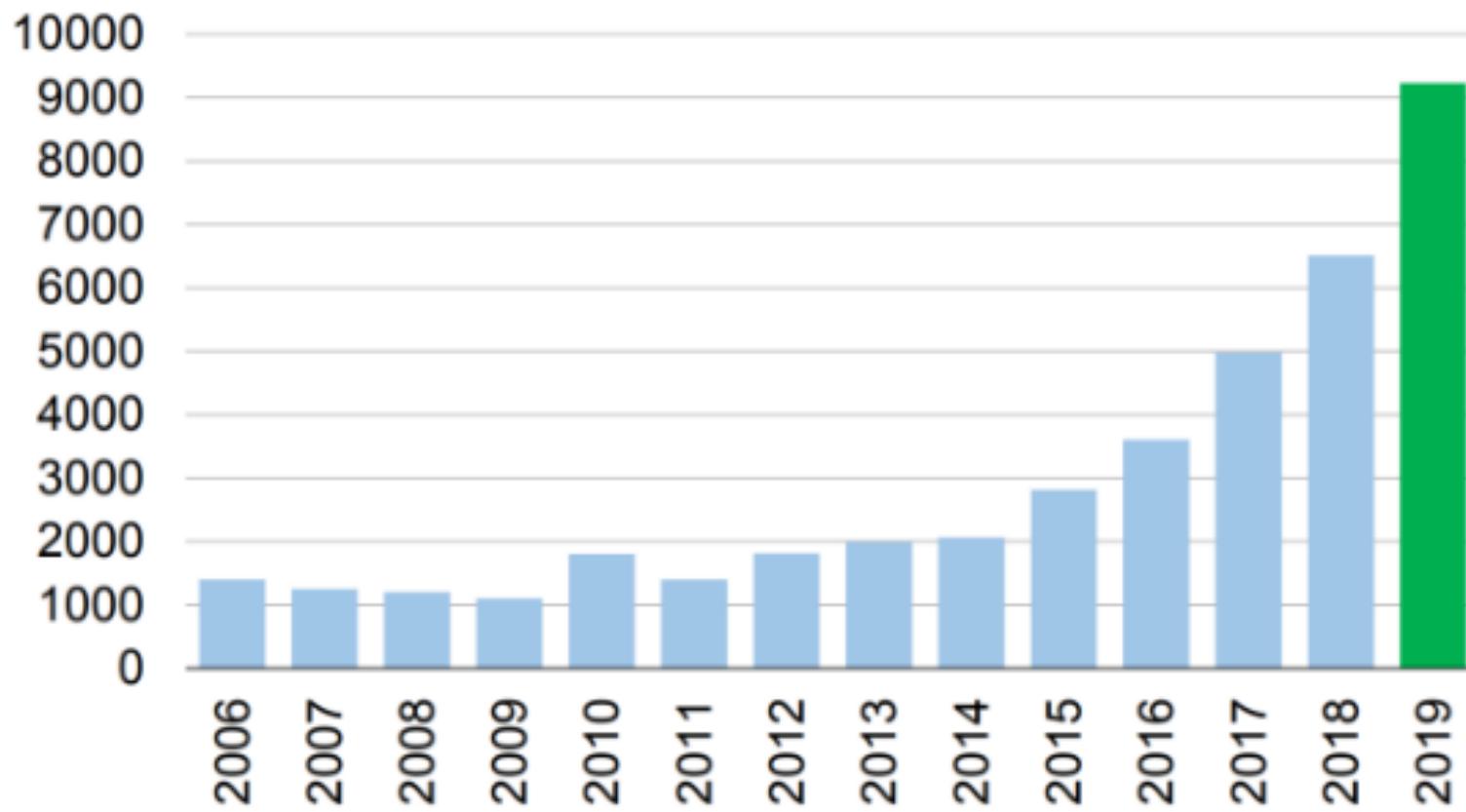
26

# CVPR Submitted and Accepted Papers



Slide Credit: [CVPR-2021 Paper-Statistics](#) 27

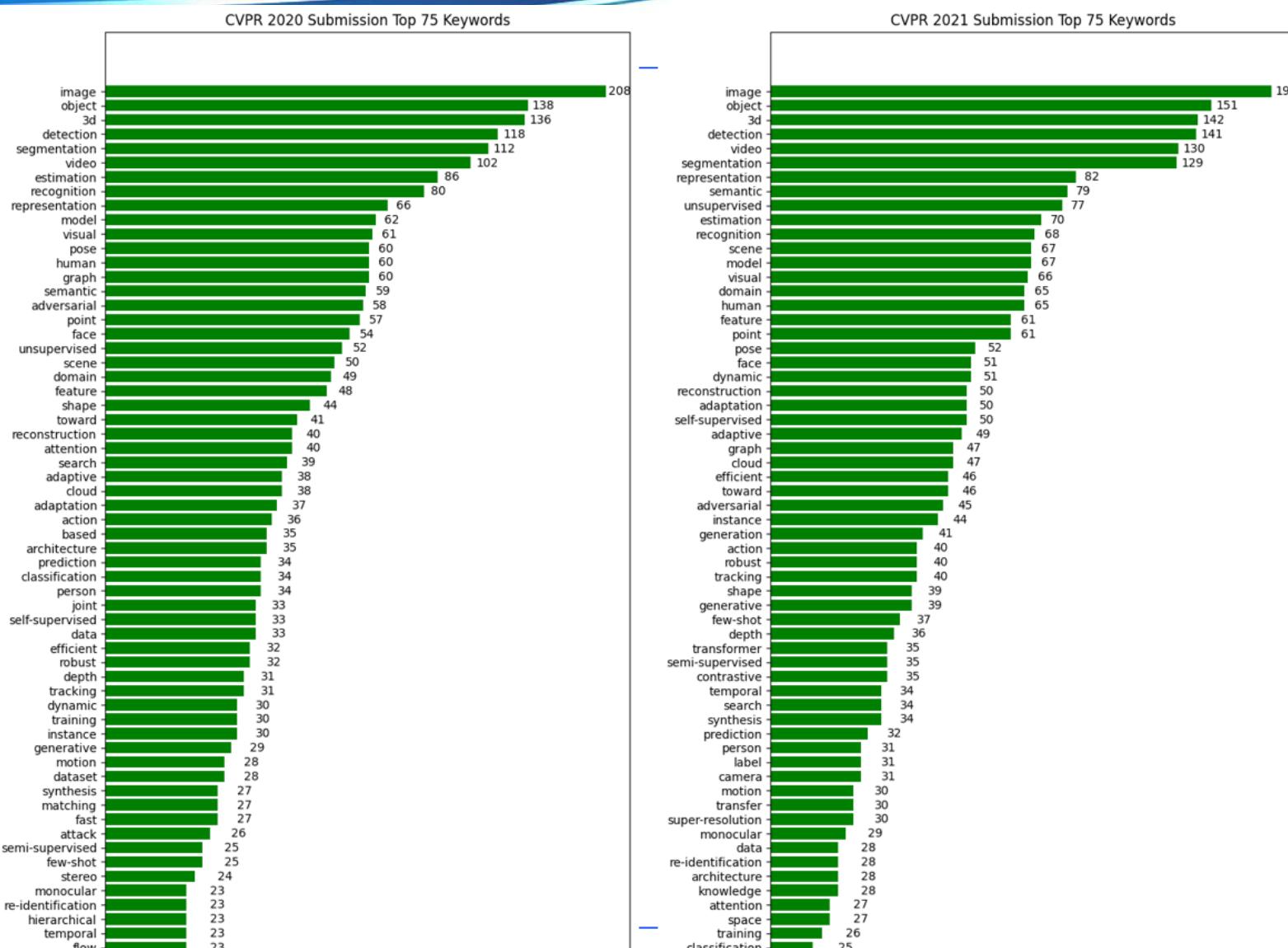
# CVPR Attendance



Slide Credit: CVPR 2019 Welcome Slides

28

# CVPR Paper Keywords statistics



# CVPR 2019 Sponsors



Milestone Sponsors



Gold Sponsors



Silver Sponsors



Slide Credit: [CVPR 2019 Welcome Slides](#) 30

# Pourquoi la perception visuelle est-elle difficile?

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
PROJECT MAC

Artificial Intelligence Group  
Vision Memo. No. 100.

July 7, 1966

## THE SUMMER VISION PROJECT

Seymour Papert

The summer vision project is an attempt to use our summer workers effectively in the construction of a significant part of a visual system. The particular task was chosen partly because it can be segmented into sub-problems which will allow individuals to work independently and yet participate in the construction of a system complex enough to be a real landmark in

Paper: The Summer Vision Project. MIT AI Memos, 1966

# Pourquoi la perception visuelle est-elle difficile?



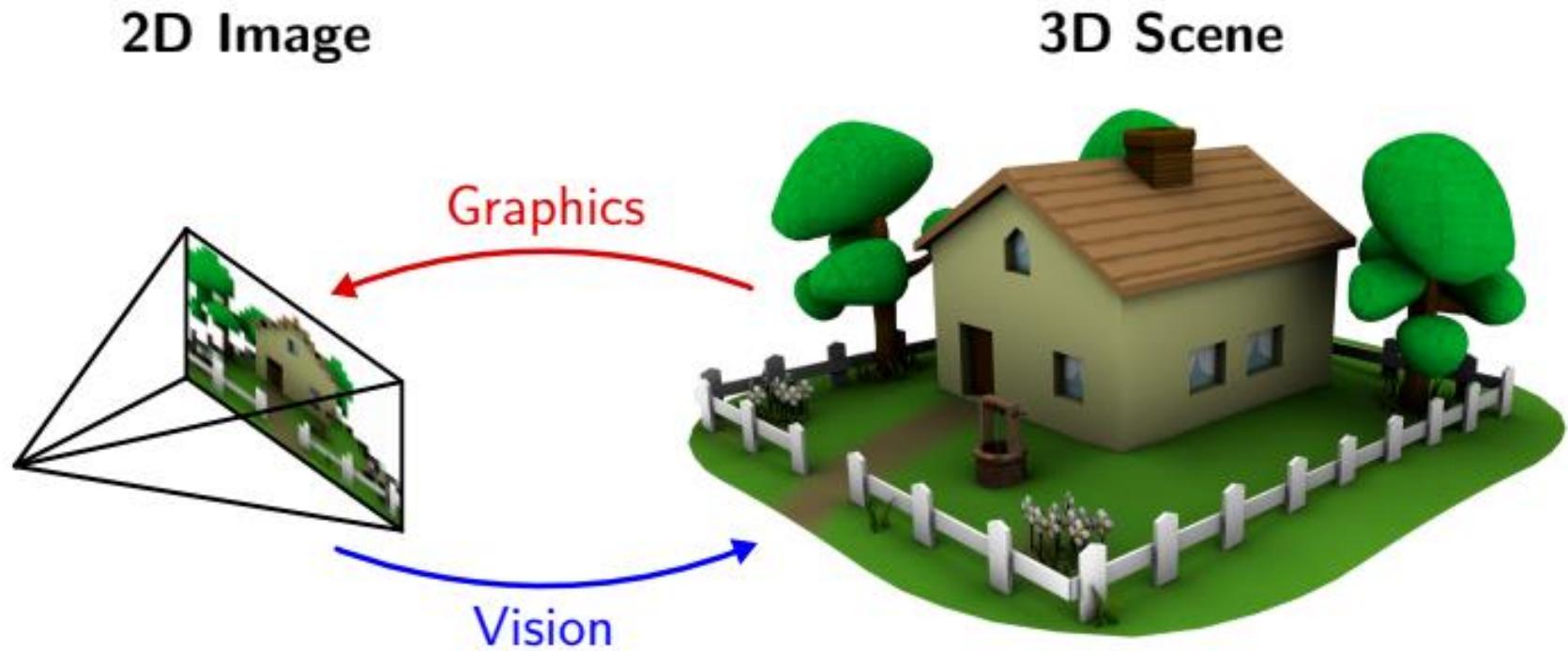
What we see

|     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 200 | 133 | 110 | 103 | 117 | 90  | 47  | 30  | 32  | 79  | 66  | 65  |
| 197 | 122 | 123 | 136 | 96  | 100 | 46  | 45  | 22  | 11  | 43  | 55  |
| 140 | 116 | 165 | 159 | 90  | 56  | 58  | 47  | 26  | 13  | 54  | 102 |
| 132 | 148 | 119 | 108 | 123 | 57  | 64  | 46  | 21  | 22  | 79  | 94  |
| 125 | 121 | 80  | 143 | 101 | 55  | 61  | 38  | 20  | 21  | 81  | 65  |
| 50  | 71  | 74  | 63  | 52  | 39  | 41  | 39  | 32  | 26  | 97  | 66  |
| 51  | 59  | 62  | 44  | 40  | 40  | 36  | 28  | 27  | 31  | 29  | 44  |
| 59  | 62  | 70  | 50  | 48  | 35  | 34  | 35  | 26  | 21  | 24  | 32  |
| 49  | 59  | 65  | 64  | 58  | 34  | 40  | 28  | 26  | 21  | 23  | 124 |
| 39  | 45  | 47  | 64  | 54  | 34  | 40  | 24  | 19  | 47  | 133 | 207 |
| 37  | 42  | 39  | 38  | 39  | 50  | 75  | 74  | 105 | 170 | 197 | 167 |
| 37  | 47  | 33  | 35  | 50  | 108 | 162 | 184 | 184 | 157 | 125 | 112 |
| 45  | 48  | 35  | 37  | 75  | 148 | 183 | 156 | 83  | 91  | 91  | 116 |
| 49  | 48  | 54  | 50  | 75  | 158 | 110 | 66  | 74  | 128 | 155 | 149 |
| 46  | 51  | 57  | 50  | 65  | 91  | 79  | 92  | 101 | 105 | 132 | 132 |
| 51  | 58  | 66  | 55  | 58  | 52  | 91  | 91  | 88  | 115 | 158 | 174 |
| 57  | 60  | 61  | 52  | 56  | 61  | 60  | 55  | 92  | 146 | 188 | 190 |
| 65  | 50  | 54  | 56  | 57  | 51  | 54  | 56  | 80  | 115 | 177 | 187 |
| 67  | 40  | 40  | 61  | 65  | 48  | 39  | 30  | 36  | 75  | 151 | 181 |
| 53  | 32  | 36  | 35  | 61  | 43  | 37  | 26  | 29  | 35  | 126 | 189 |
| 29  | 42  | 107 | 20  | 28  | 41  | 40  | 26  | 30  | 36  | 113 | 200 |
| 30  | 21  | 32  | 24  | 34  | 37  | 33  | 23  | 25  | 39  | 105 | 171 |
| 32  | 28  | 19  | 23  | 29  | 36  | 47  | 69  | 132 | 169 | 183 | 126 |
| 31  | 25  | 62  | 54  | 47  | 44  | 81  | 190 | 227 | 231 | 206 | 155 |
| 44  | 66  | 99  | 72  | 67  | 63  | 69  | 128 | 127 | 115 | 109 | 157 |
| 53  | 47  | 47  | 41  | 29  | 32  | 25  | 20  | 41  | 81  | 89  | 175 |
| 38  | 44  | 61  | 73  | 54  | 48  | 37  | 87  | 90  | 111 | 126 | 189 |
| 39  | 41  | 83  | 97  | 86  | 91  | 74  | 134 | 131 | 153 | 143 | 185 |
| 42  | 56  | 98  | 102 | 112 | 111 | 94  | 137 | 121 | 141 | 146 | 181 |
| 94  | 114 | 114 | 114 | 122 | 113 | 77  | 117 | 117 | 154 | 149 | 169 |
| 157 | 176 | 116 | 121 | 130 | 139 | 103 | 161 | 146 | 180 | 145 | 125 |
| 143 | 178 | 182 | 178 | 139 | 153 | 129 | 168 | 175 | 187 | 170 | 152 |
| 127 | 183 | 203 | 187 | 153 | 164 | 143 | 180 | 195 | 182 | 165 | 211 |
| 86  | 107 | 127 | 125 | 101 | 107 | 100 | 123 | 149 | 186 | 167 | 215 |

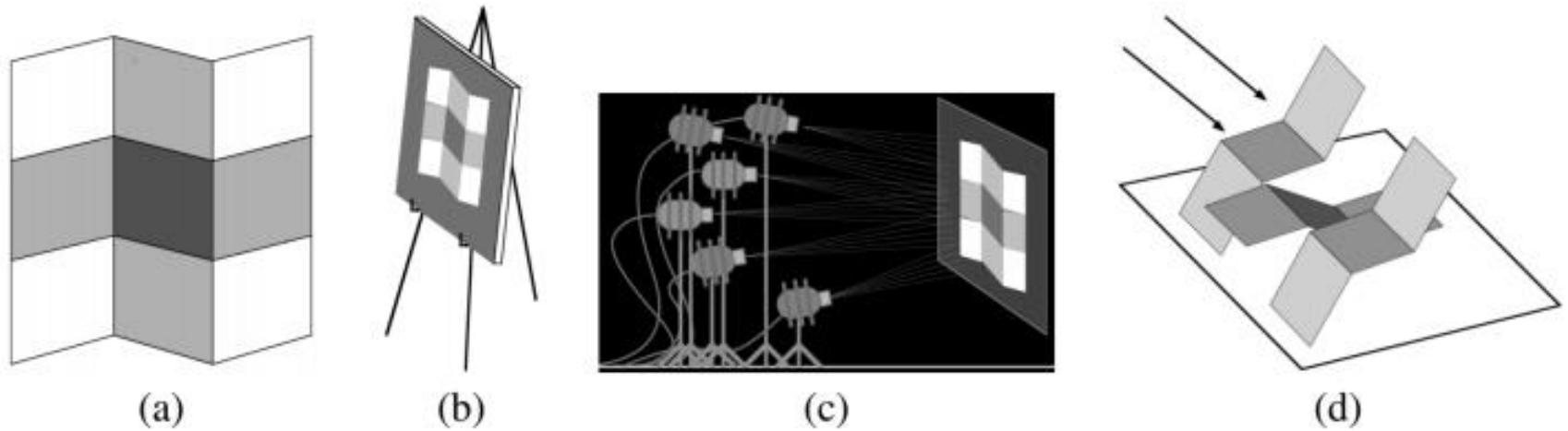
What the computer sees

Slide Credits: [Li Fei-Fei](#)

# Challenges : Les images sont des projections 2D du monde 3D



# Challenges : Les images sont des projections 2D du monde 3D

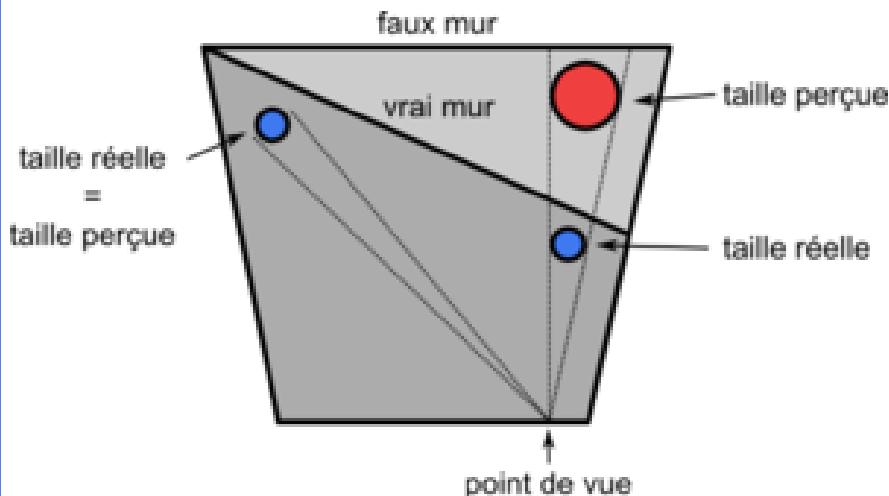


## ◆ Le workshop de Adelson et Pentland's

- pour expliquer une image (a) en termes de **réflectance**, d'**éclairage** et de **forme**, (b) un **peintre**, (c) un **éclairagiste** et (d) un **sculpteur** concevront **trois solutions différentes**, mais plausibles.

[Adelson and Pentland's: The perception of shading and reflectance. Perception as Bayesian inference, 1996](#)<sup>34</sup>

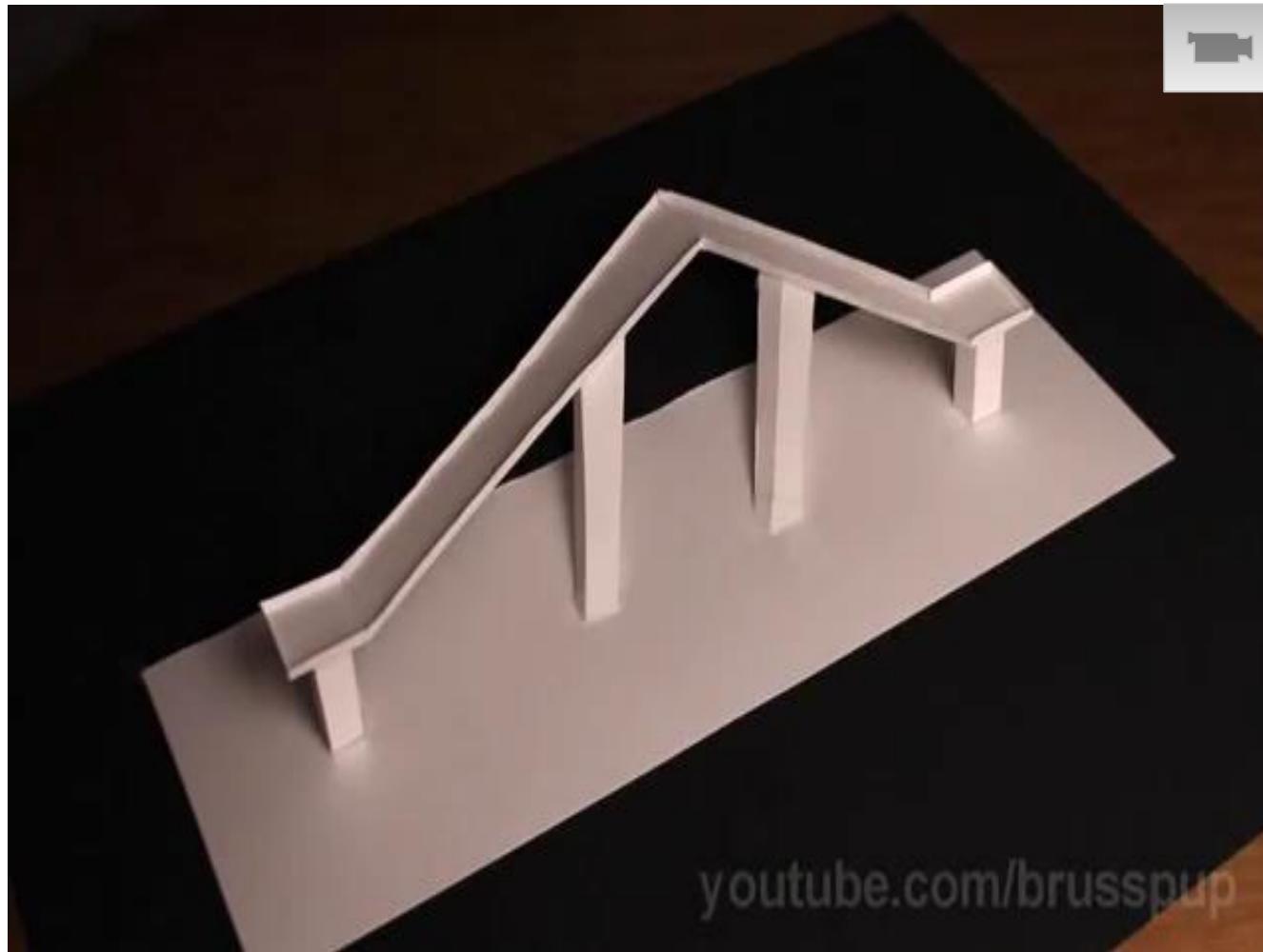
# Illusion de la chambre d'Ames



# Illusion de la chambre d'Ames



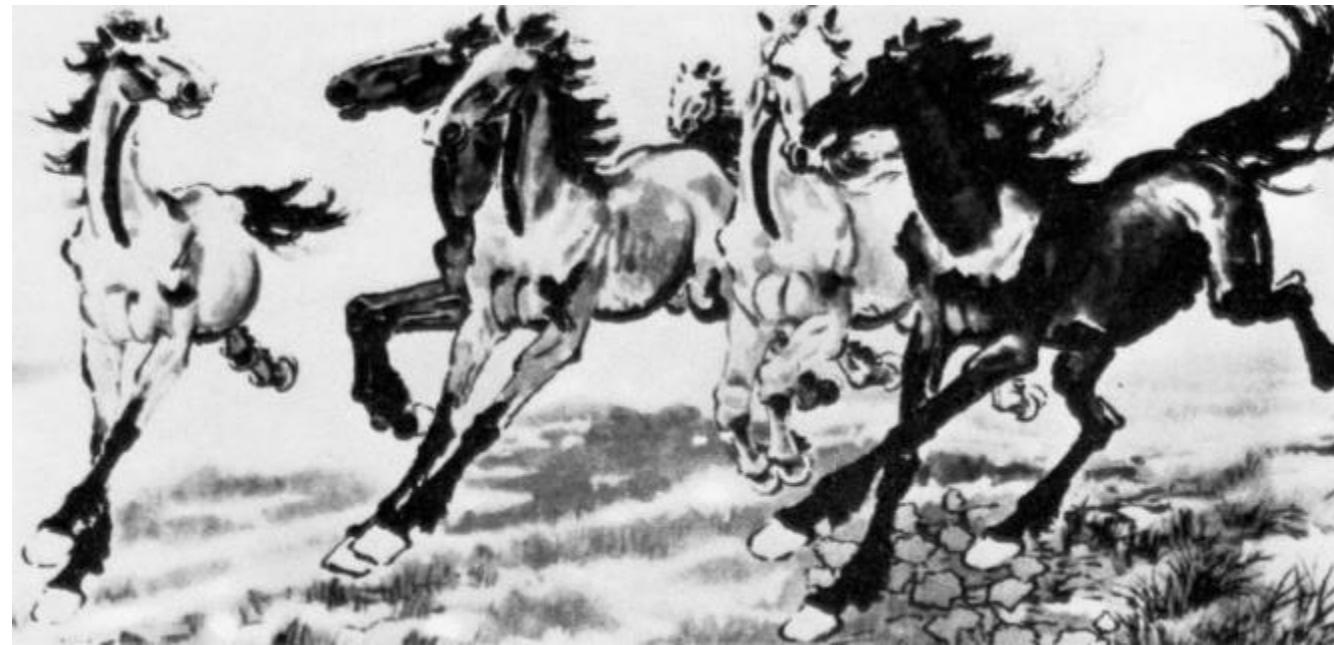
# Illusion: phénomène physique impossible



# Challenges: variation du point de vue



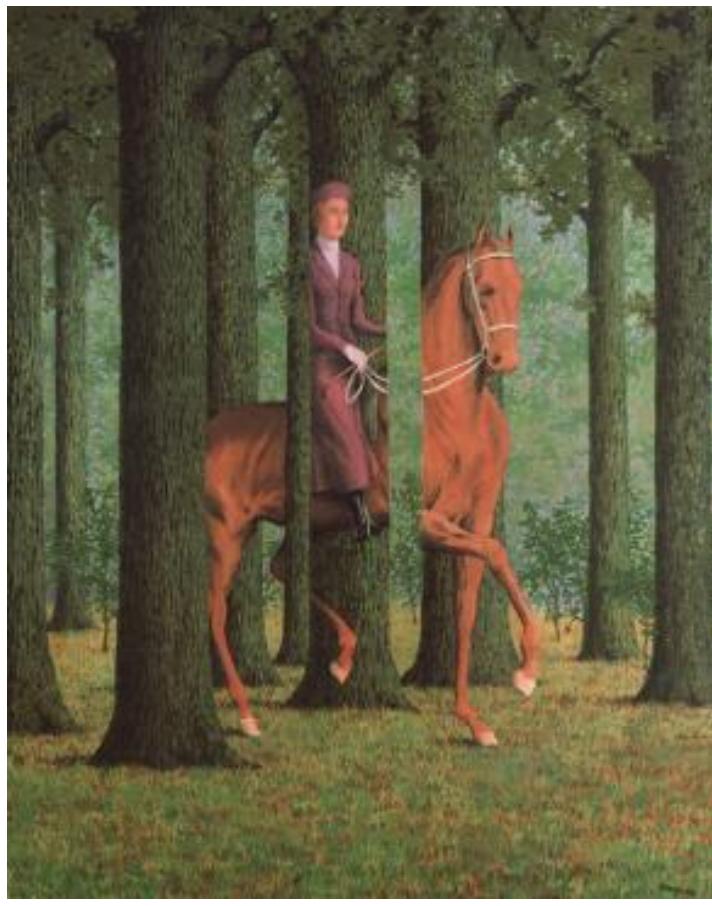
# Challenges: déformation



Xu Beihong (1943)

Sonda Ammar

# Challenges: Occlusion



[\*\*René Magritte \(1957\)\*\*](#)

# Challenges: éclairage



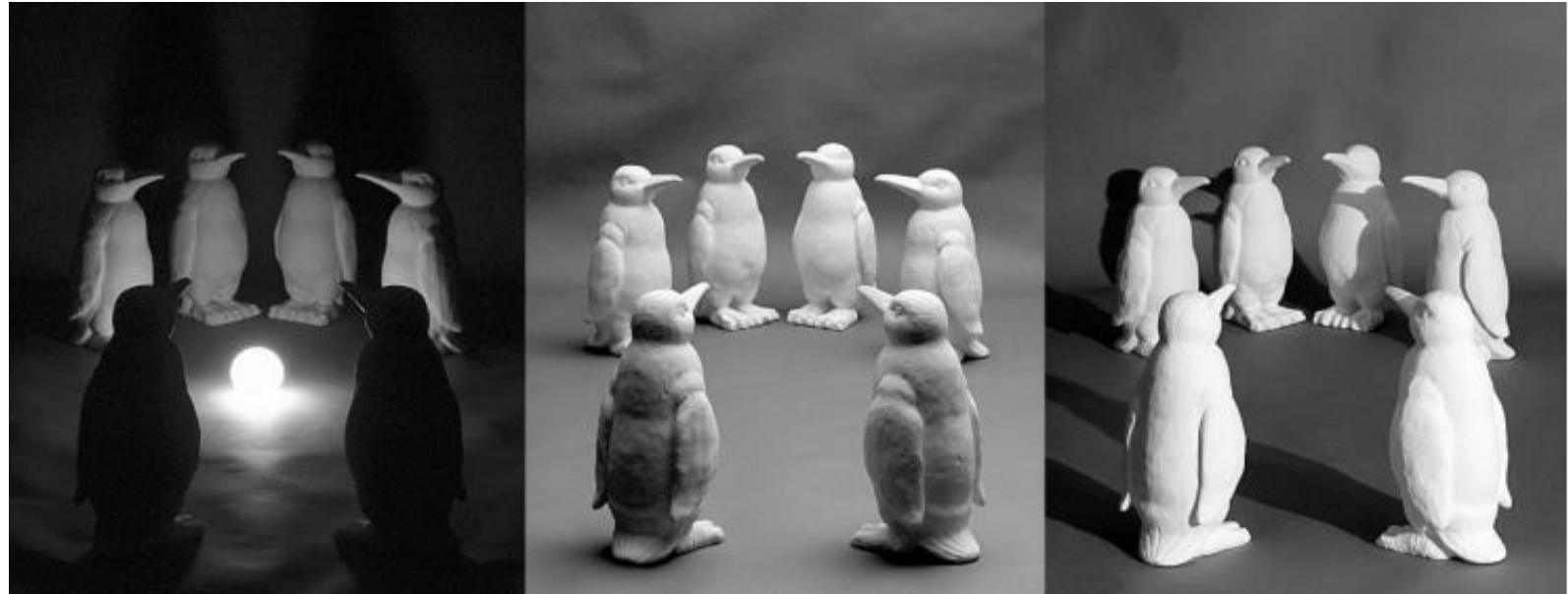
# Challenges: éclairage



# Challenges: éclairage



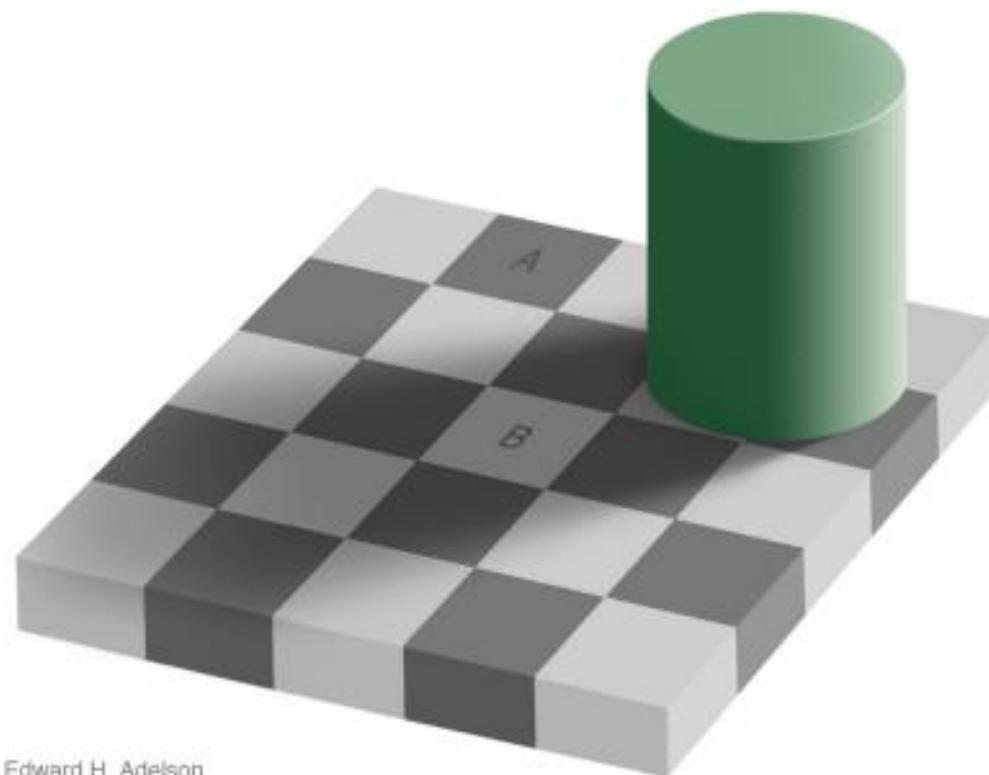
# Challenges: éclairage



# Challenges: Mouvement



# Challenges: perception et mesure

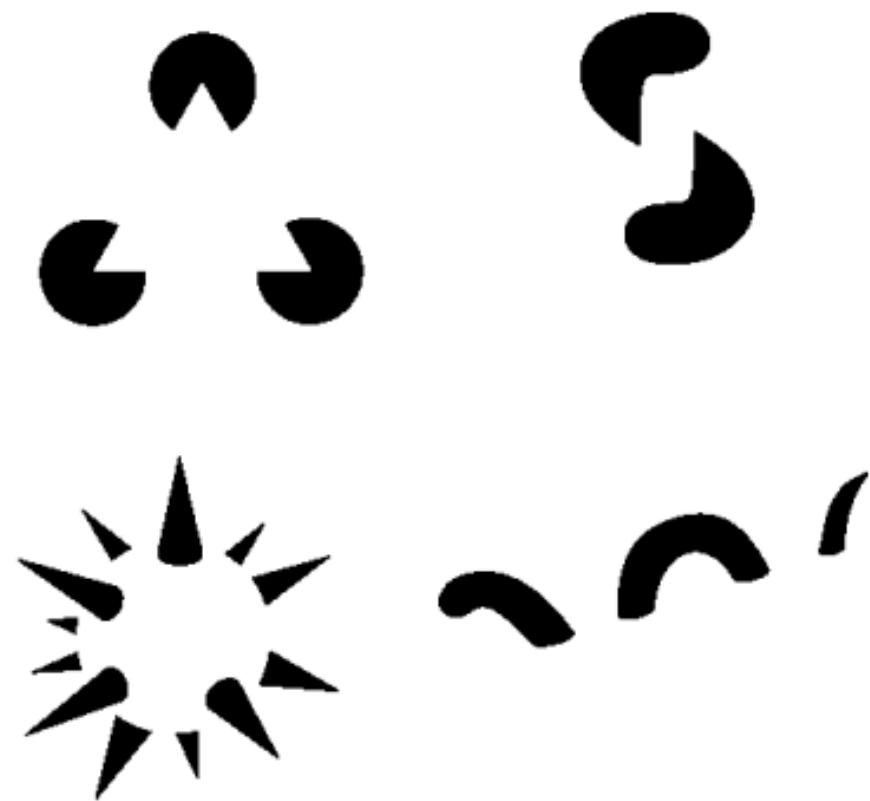


Edward H. Adelson

<http://persci.mit.edu/gallery/checkershadow>

Plus d'exemples

# Challenges: perception et mesure



Gaetano Kanizs (1976)

47

# Challenges: perception et mesure



# Challenges: local ambiguïtés



Image credits: Antonio Torralba

# Challenges: local ambiguïtés

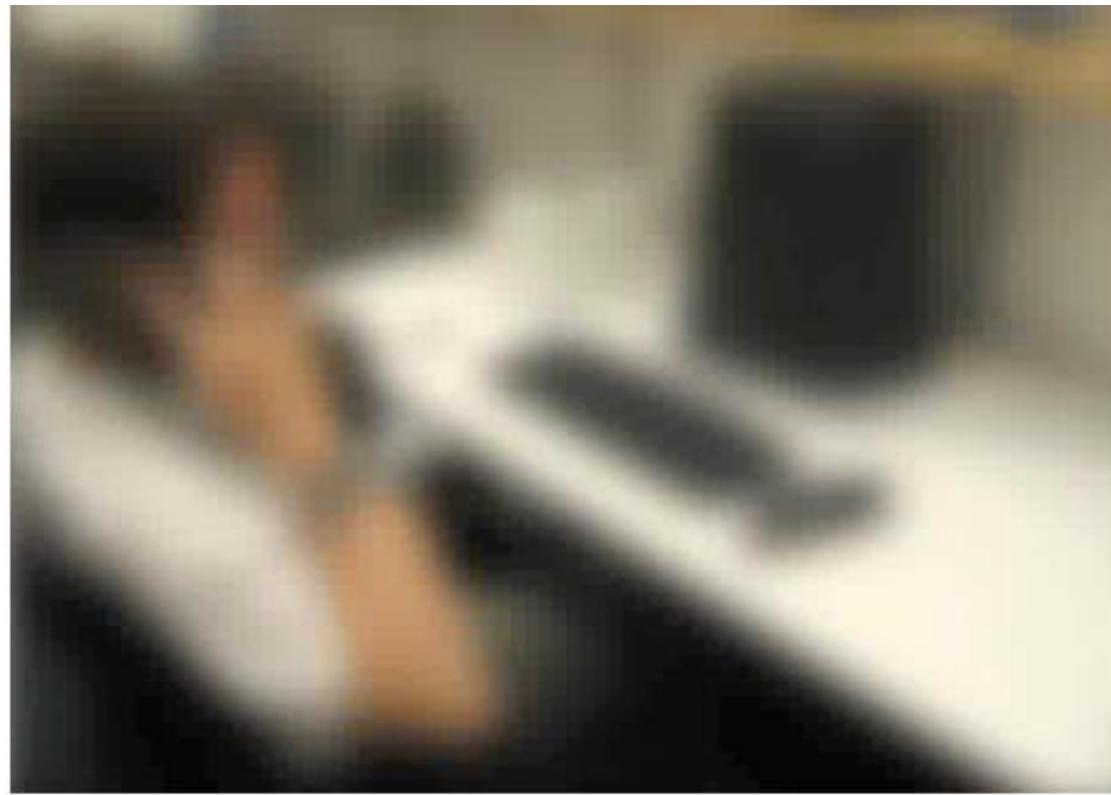


Image credits: Antonio Torralba

# Challenges: local ambiguïtés



Image credits: Antonio Torralba

# Challenges: local ambiguïtés



# Challenges: local ambiguïtés



# Challenges: Variation intra-classe



<http://www.homeworkshop.com/>

Image credits: Antonio Torralba

54

# Challenges: Variation intra-classe



Courtesy: Oregon Zoo



©



Chat Caracal

Chat Ocelot

Chat Sphynx

# Challenges: nombre de catégories d'objets



Image credits: Antonio Torralba

# Applications: limites



## L'USINE DIGITALE

AR/VR   5G   Intelligence artificielle   Mobilité   Cybersécurité   IOT   Plus ▾

ACCUEIL > COMPUTER VISION

### Des systèmes de reconnaissance faciale auraient été trompés par des masques et photos

**VU AILLEURS** Une équipe de chercheurs aurait réussi à duper des systèmes de reconnaissance faciale pour effectuer des achats en ligne ou franchir les zones de sécurité dans un aéroport... à l'aide de masques ou de simples photos. De quoi remettre en cause l'efficacité de cette technologie, et rendre nécessaires quelques mises à jour.

ARTHUR LE DENN

PUBLIÉ LE 16 DÉCEMBRE 2019 À 17H53

COMPUTER VISION, SÉCURITÉ, WECHAT

# La confidentialité

## Des organismes font actuellement campagne pour interdire la reconnaissance faciale dans les endroits publics.



### L'USINE DIGITALE

5G Intelligence artificielle Mobilité Cybersécurité IOT Plus ▾

#### La Cnil entérine l'interdiction des caméras "intelligentes" pour détecter les infractions [Sans titre]

Les pouvoirs publics ne peuvent pas déployer de caméras "intelligentes" pour détecter des infractions dans l'espace public, juge la Cnil dans une prise de position. Une loi devra être adoptée pour qu'ils puissent le faire. En revanche, les caméras utilisées à des fins statistiques peuvent être utilisées sans encadrement supplémentaire.

ALICE VITARD | PUBLIÉ LE 19 JUILLET 2022 |

GDPR - RGPD, CAMERA, INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

#### Des groupes demandent à Ottawa d'interdire la reconnaissance faciale



Reconnaissance faciale : comment et où est-elle utilisée actuellement en France ?

Par Mathieu Chartier (@chartier\_mat) | Publié le 23/11/21 à 17h00

Partager :



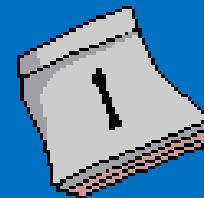
COMMENTER

La reconnaissance faciale s'immisce peu à peu dans nos vies, faisant craindre aux défenseurs de la vie privée de futures dérives, entre surveillance généralisée et autoritarisme. Technopole propose un bilan de la situation en France.



Le géant chinois Alibaba expérimente un système de reconnaissance faciale pour autoriser un paiement.

# Chapitre



**Vision par ordinateur : Filtrage d'images**

# PLAN

- ❖ **Introduction**
- ❖ **Objectifs du filtrage d'images**
- ❖ **Filtres passe-bas**
- ❖ **Filtres passe-haut**
- ❖ **Filtrage réhausseur**
- ❖ **Filtrage Spatial**

# Introduction

- ❖ **Appliquer des opérations bas niveau simples (prétraitement) sur les images, afin d'y extraire l'information pertinente pour la tâche à résoudre**
- ❖ **La détection d'un objet dans une scène nécessite la recherche de caractéristiques dans l'image.**
- ❖ **Plusieurs types de caractéristiques : Contour, squelette, régions,**
- ❖ **La phase de la recherche de caractéristiques consiste à extraire les informations les plus utiles et pertinentes pour:**
  - Représenter les différentes classes,
  - Discriminer entre les différentes classes,

# Les objectifs du filtrage d'image

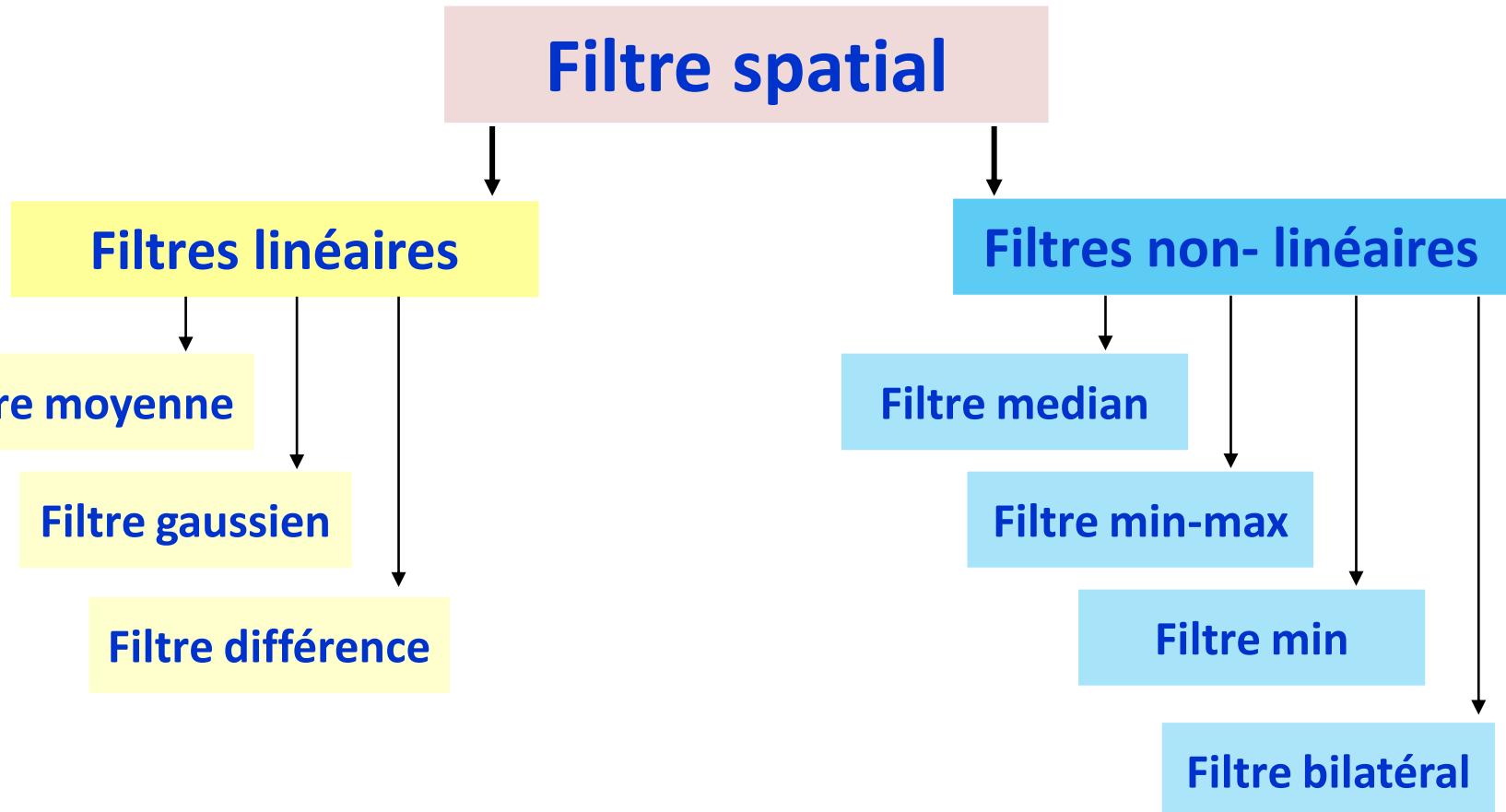
- ❖ **L'acquisition de données, images, s'accompagne toujours d'une distorsion/dégradation.**
- ❖ **Il existe différentes sources de dégradation (bruit) d'une image:**
  - Bruit lié au contexte de l'acquisition : mouvement, mauvaises conditions d'éclairage, ...
  - Bruit lié au capteur: capteur de mauvaise qualité, mauvaise mise au point, ...
  - Bruit lié à l'échantillonnage : une mauvaise fréquence d'échantillonnage peut introduire dans l'image des points blancs ou noirs connus souvent sous l'appellation « sel et poivre ».
  - Bruit lié à la nature de la scène: présence de fumé, fort éclairage, manque de luminosité

# Les objectifs du filtrage d'image

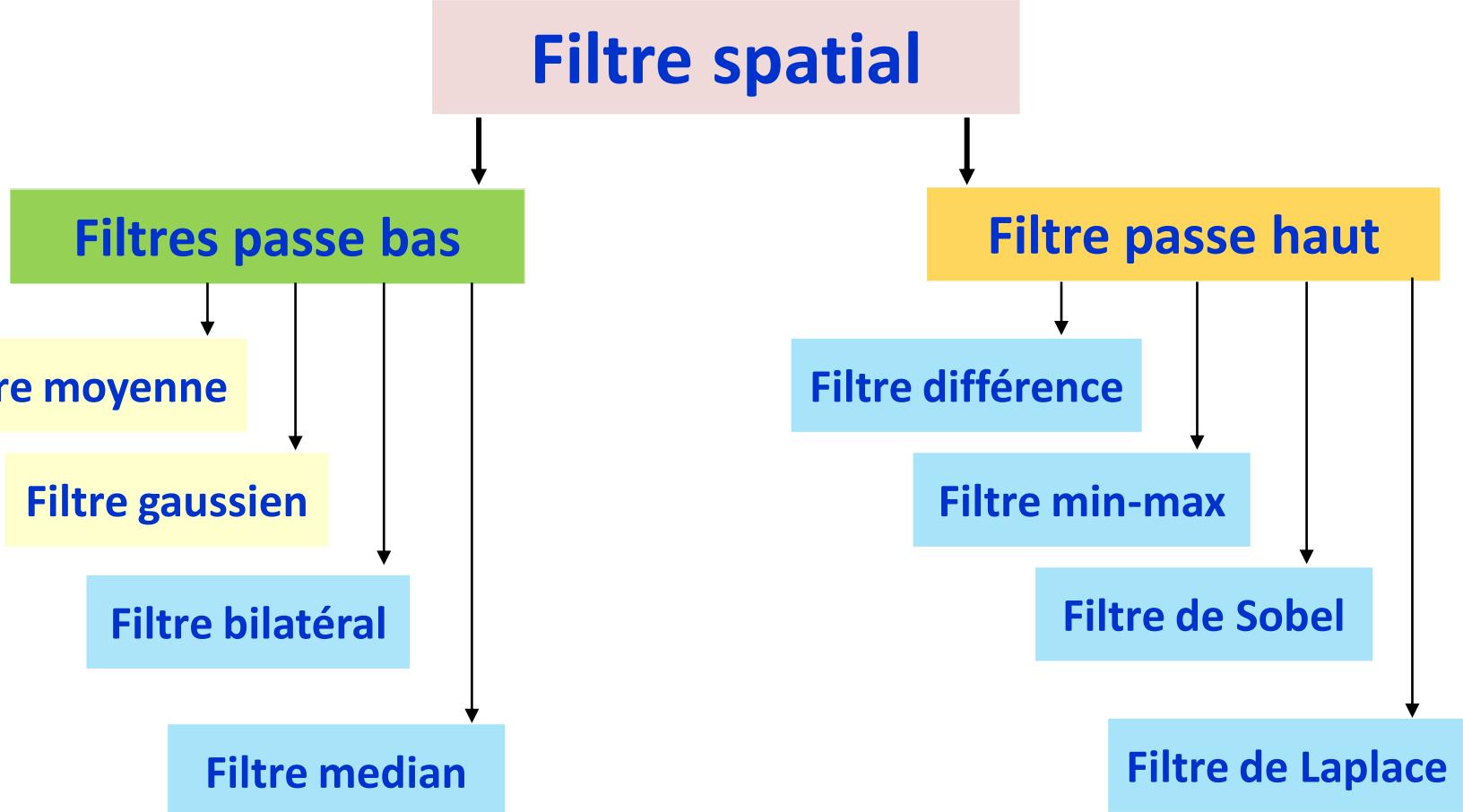
## ◆ Objectifs de l'étape de filtrage:

- Réduction du bruit
- Amélioration de la netteté
- Détection de contours
- Amélioration du contraste
- Suppression de fond

# Filtrage spatial



# Filtrage spatial

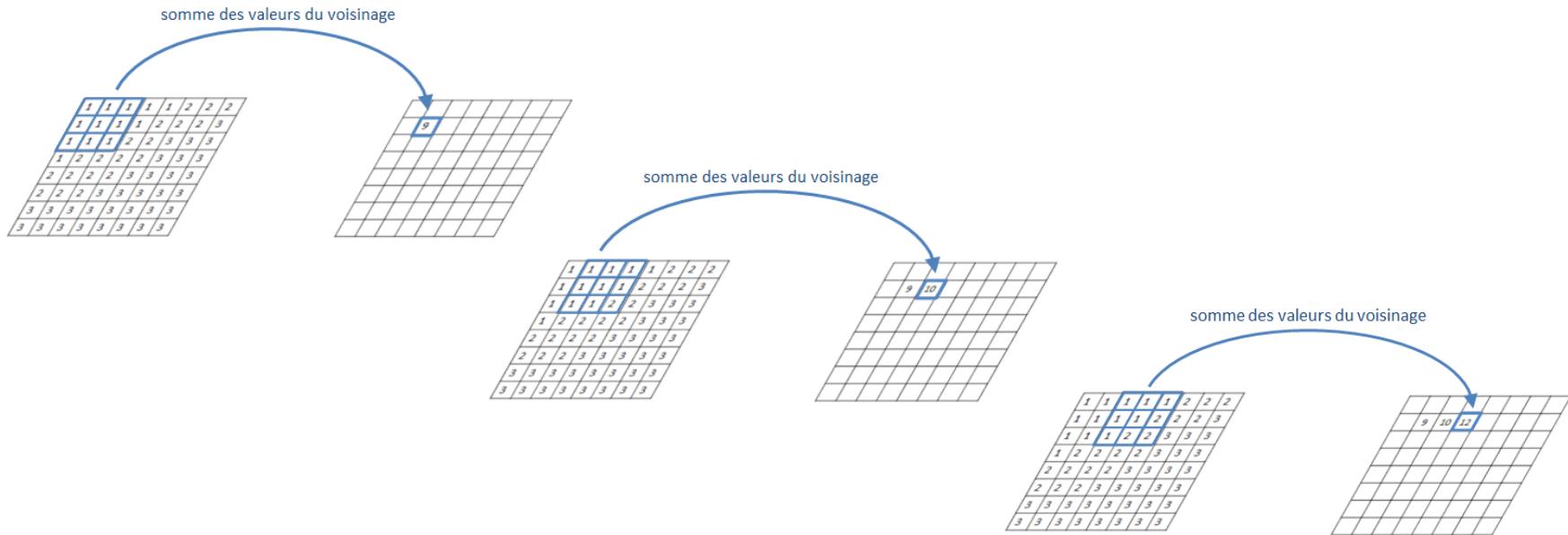


# Filtrage spatial

- ❖ **Le filtrage spatial correspond à des opérations permettant de modifier chaque pixel de l'image en fonction des valeurs des pixels de son voisinage.**
- ❖ **La définition d'un filtre spatial englobe :**
  - Le support du filtre : taille et forme du voisinage considéré : c'est souvent un carré de taille impaire ( $3 \times 3$ ,  $5 \times 5$ ,  $7 \times 7$ , ...)
  - La position du pixel central dans le support ;
  - L'algorithme utilisé pour le calcul de la valeur de sortie à partir des valeurs du voisinage.

# Transformations de voisinage

- ◆ Une transformation de voisinage est telle que la nouvelle valeur d'un pixel tient compte des pixels appartenant au voisinage du pixel considéré.
- ◆ Balayage de l'image par le masque de convolution:



# Gestion des bords

- ❖ Pour les pixels du bord, le masque déborde l'image. Les valeurs des pixels du bord sont indéfinies,
- ❖ Pour obtenir des valeurs plausibles, différentes solutions peuvent être adoptées :
  - **Zero-padding** : on suppose que les pixels en dehors de l'image sont de valeur nulle ;
  - **Duplication** : on duplique les premières et dernières lignes et colonnes au-delà des bords ;
  - **Miroir** : on duplique l'image en miroir au-delà des bords.

|   |   |    |    |   |   |   |   |   |   |
|---|---|----|----|---|---|---|---|---|---|
| ? | ? | ?  | ?  | ? | ? | ? | ? | ? | ? |
| ? | 9 | 10 | 12 |   |   |   |   |   | ? |
| ? |   |    |    |   |   |   |   |   | ? |
| ? |   |    |    |   |   |   |   |   | ? |
| ? |   |    |    |   |   |   |   |   | ? |
| ? | ? | ?  | ?  | ? | ? | ? | ? | ? | ? |

# Filtres passe-bas



## But :

- Filtrage du bruit
- Eliminer les points sel et poivre
- Lissage des images



## Principe :

- Sommation

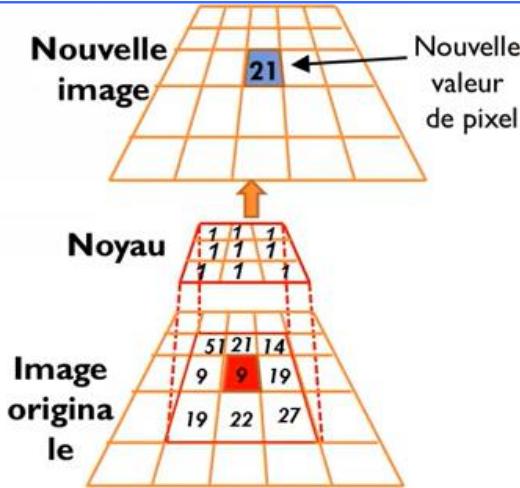


## Exemples:

- |           |             |             |
|-----------|-------------|-------------|
| ● Moyenne | ● Gaussien  | ● Bilatéral |
| ● Médian  | ● Adaptatif |             |

# Filtre moyenneur

$$\left[ \begin{array}{l} 1 \times 51 + 1 \times 21 + 1 \times 14 + \\ 1 \times 9 + 1 \times 9 + 1 \times 19 + \\ 1 \times 19 + 1 \times 22 + 1 \times 27 + \end{array} \right] / 9 = 21$$



|     |     |     |
|-----|-----|-----|
| 1/9 | 1/9 | 1/9 |
| 1/9 | 1/9 | 1/9 |
| 1/9 | 1/9 | 1/9 |

L'effet du filtrage passe-bas :

- un lissage global de l'image,
- floutage des contours,
- suppression des détails
- et lissage des textures.



image : Annick Leroy

# Filtre Gaussien

- ◆ Des filtres gaussiens de différents écarts types produisent des masques de convolution de différentes tailles.
- ◆ Exemples :

$1/16 \times$

|   |   |   |
|---|---|---|
| 1 | 2 | 1 |
| 2 | 4 | 2 |
| 1 | 2 | 1 |

$\frac{1}{331} \times$

|   |    |    |    |   |
|---|----|----|----|---|
| 1 | 4  | 7  | 4  | 1 |
| 4 | 20 | 33 | 20 | 4 |
| 7 | 33 | 55 | 33 | 7 |
| 4 | 20 | 33 | 20 | 4 |
| 1 | 4  | 7  | 4  | 1 |



image originale



filtre gaussien 5x5



image : Annick Leroy

# Filtre médian

|    |     |    |
|----|-----|----|
| 30 | 10  | 20 |
| 10 | 250 | 25 |
| 20 | 25  | 30 |

Moyenne = 47 à cause de 250

Médiane = 25

10, 10, 20, 20, 25, 25, 30, 30, 250

Moyenne autour de la médiane = 25

image originale



filtrage médian 5x5



médian  
5x5



moyenneur  
5x5

# Filtre médian

|    |    |    |     |     |     |
|----|----|----|-----|-----|-----|
| 10 | 10 | 10 | 130 | 130 | 130 |
| 10 | 10 | 10 | 130 | 130 | 130 |
| 10 | 10 | 10 | 130 | 130 | 130 |
| 10 | 10 | 10 | 130 | 130 | 130 |
| 10 | 10 | 10 | 130 | 130 | 130 |
| 10 | 10 | 10 | 130 | 130 | 130 |

filtré  
moyenneur

--->

|    |    |    |    |     |     |
|----|----|----|----|-----|-----|
| 10 | 10 | 50 | 90 | 130 | 130 |
| 10 | 10 | 50 | 90 | 130 | 130 |
| 10 | 10 | 50 | 90 | 130 | 130 |
| 10 | 10 | 50 | 90 | 130 | 130 |
| 10 | 10 | 50 | 90 | 130 | 130 |

le  
contour  
est flou

filtré  
médian

--->

|    |    |    |     |     |     |
|----|----|----|-----|-----|-----|
| 10 | 10 | 10 | 130 | 130 | 130 |
| 10 | 10 | 10 | 130 | 130 | 130 |
| 10 | 10 | 10 | 130 | 130 | 130 |
| 10 | 10 | 10 | 130 | 130 | 130 |
| 10 | 10 | 10 | 130 | 130 | 130 |

le  
contour  
est  
conservé

# Filtre médian

|    |    |     |    |    |
|----|----|-----|----|----|
| 10 | 10 | 10  | 10 | 10 |
| 10 | 10 | 10  | 10 | 10 |
| 10 | 10 | 100 | 10 | 10 |
| 10 | 10 | 10  | 10 | 10 |
| 10 | 10 | 10  | 10 | 10 |

filtré  
moyenneur  
--->

|    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|
| 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 10 | 20 | 20 | 20 | 10 |
| 10 | 20 | 20 | 20 | 10 |
| 10 | 20 | 20 | 20 | 10 |
| 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |

le bruit  
est étalé

filtré  
médian  
--->

|    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|
| 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |

le bruit  
est  
supprimé



moyenneur 3x3



moyenneur 5x5



moyenneur 7x7



médian 5x5

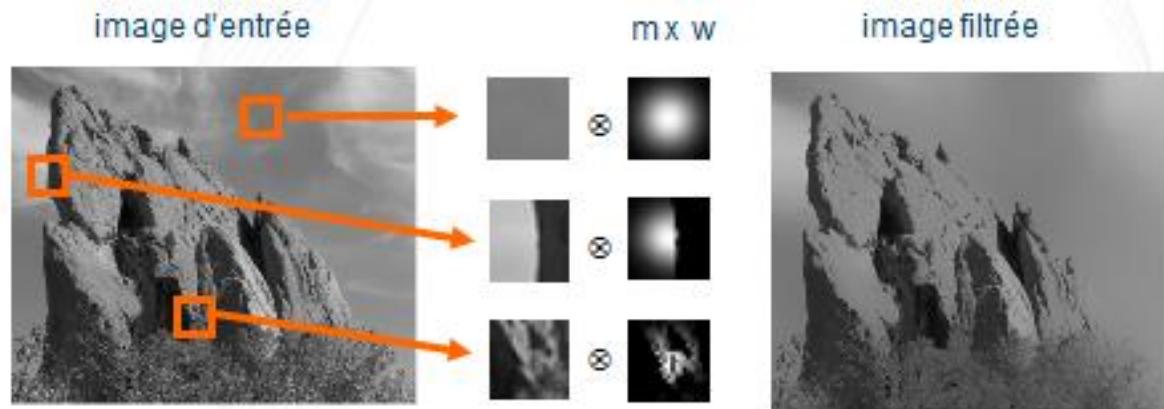
# Filtre bilatéral

- ◆ Le filtre bilatéral est utilisé pour le lissage de l'image avec conservation des contours.
- ◆ Il permet de lisser sans prendre en compte les pixels qui sont « de l'autre côté du contour ».
- ◆ Principe: utilisation d'un masque de convolution  $b(i,j)$  avec une pondération, qui dépend du voisinage.

$$b(i,j) = M(i,j) \times w(i,j)$$

- $M(i,j)$  est un masque de convolution classique
- $w(i,j)$  est une fonction de pondération de chaque pixel du voisinage, selon sa similarité avec le pixel central  $(x,y)$

# Filtre bilatéral



source : Fredo Durand



source : Tomasi et Manduchi

# Filtres passe-haut



## But :

- DéTECTEUR de contours
- DéTECTEUR de coins
- rehausser images



## Principe :

- Déviation



## Exemples:

- |             |          |
|-------------|----------|
| ● Gradient  | ● Harris |
| ● Laplacien | ● Canny  |

# Filtre différence

◆ Le filtre différence est un filtre linéaire permettant d'accentuer les contours et les contrastes dans l'image.

◆ Principe :

- Calculer la différence entre le pixel central et ses voisins
- Ajouter la somme des différences au pixel central
- un facteur multiplicatif peut être appliqué sur la somme pour un effet plus accentué

|    |    |    |
|----|----|----|
| -1 | -1 | -1 |
| -1 | 9  | -1 |
| -1 | -1 | -1 |

|    |    |    |
|----|----|----|
| -2 | -2 | -2 |
| -2 | 17 | -2 |
| -2 | -2 | -2 |

|    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|
| -1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| -1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| -1 | -1 | 25 | -1 | -1 |
| -1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| -1 | -1 | -1 | -1 | -1 |

# Filtre différence

❖ Exemple: l'impact de la taille du voisinage (rayon) et du facteur multiplicatif (gain).



image d'entrée



rayon=4 gain=50%



rayon=20 gain=50%



rayon=20 gain=150%

# Filtre min-max

- ◆ Le filtre Min-Max est basé sur le principe de comparaison de la valeur du pixel central avec son voisinage.
- ◆ Principe :

si  $im(x, y) > (MIN + MAX)/2$

alors  $im_{filtrée}(x, y) = MAX$

sinon  $im_{filtrée}(x, y) = MIN$

où MIN et MAX sont respectivement la valeur min et la valeur max sur le voisinage du pixel (x,y).

# Filtre min-max VS filtre différence



image originale



filtre différence 5x5,  
gain=100% (centre à 24)



filtre min-max 5x5

# Détection de contour

- ❖ Il existe plusieurs méthodes de détection de contour.
- ❖ Les deux approches les plus utilisées:
  - Approximation du Gradient
  - Approximation du Laplacien

# Détection de contour

## Gradient

- ◆ Le calcul du gradient de l'image est obtenu par l'intermédiaire de deux masques: un gradient **horizontal**, un gradient **vertical**
- ◆ Calculer le module du gradient,
- ◆ Effectuer une sélection des contours les plus marqués (les points de plus fort contraste par un seuillage),
- ◆ Les directions des contours étant orthogonales à la direction déterminée en tout pixel de l'image
- ◆ Variation verticale:  $I_V[i, j] = I[i + 1, j] - I[i, j]$
- ◆ Variation horizontale:  $I_h[i, j] = I[i, j + 1] - I[i, j]$

# Détection de contour

## Gradient

- ◆ Un pixel ferait partie d'un contour si la somme des variations horizontale et verticale est élevée

$$E[i, j] = \sqrt{(I_V[i, j]^2 + I_{H(i, j)}^2)}$$

- ◆ Un seuil est nécessaire pour déterminer si un pixel fait partie du contour ou non

# Détection de contour

## Gradient

◆ Le calcul des tableaux H et V peut être vu comme l'application d'une **corrélation 2D**

|     |     |     |   |   |
|-----|-----|-----|---|---|
| 0   | 0   | 255 | 0 | 0 |
| 0   | 0   | 255 | 0 | 0 |
| 0   | 0   | 255 | 0 | 0 |
| 0   | 255 | 0   | 0 | 0 |
| 255 | 0   | 0   | 0 | 0 |

$X$

Image originale



|     |     |
|-----|-----|
| 0   | 0.5 |
| 0.5 | 0   |

=

|     |     |     |   |
|-----|-----|-----|---|
| 0   | 128 | 128 | 0 |
| 0   | 128 | 128 | 0 |
| 0   | 255 | 0   | 0 |
| 255 | 0   | 0   | 0 |

$X \star W$

Noyau du filtre

# Détection de contour

## Gradient

- ◆ Une opération liée à la corrélation, fréquemment utilisée en vision par ordinateur, est la **convolution 2D**
- ◆ La convolution est comme la corrélation, mais le point de référence des indexées du filtre débute à la dernière rangée et colonne

$$\begin{matrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 255 \\ 255 & 0 \end{matrix} \quad \begin{matrix} 255 & 0 & 0 \\ 255 & 0 & 0 \\ 255 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{matrix}$$

$X$

Symbolle mathématique de la convolution 2D

$$\begin{matrix} * \\ 0 & 0.5 \\ 0.5 & 0 \end{matrix} \quad W \quad = \quad \begin{matrix} 0 & 128 & 128 & 0 \\ 0 & 128 & 128 & 0 \\ 0 & 255 & 0 & 0 \\ 255 & 0 & 0 & 0 \end{matrix}$$

$X * W$

# Détection de contour

## Gradient : Prewitt et Sobel



Les masques dérivateur sont:

|    |    |    |
|----|----|----|
| -1 | -c | -1 |
| 0  | 0  | 0  |
| 1  | c  | 1  |

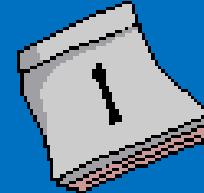
horizontal

|    |   |    |
|----|---|----|
| -1 | 0 | -1 |
| -c | 0 | c  |
| 1  | 0 | 1  |

vertical

- $c=1$ : il s'agit des opérateurs de Prewitt
- $c=2$ : il s'agit des opérateurs de Sobel
- Chaque pixel des masques est normalisé par  $1/(c+2)$
- L'origine de ces masques est toujours le pixel central

# **Chapitre**



**Domaine de la Morphologie Mathématique**

# Objectifs

- ❖ **Connaître l'origine de la morphologie mathématique et ce qui la différencie des autres approches**
- ❖ **Les concepts de l'Érosion et de la Dilatation**
- ❖ **Les processus d'ouverture et de fermeture**
- ❖ **Des opérations morphologiques de plus haut niveau, d'extraction de contours: Gradients Morphologiques**

- ❖ **La Morphologie Mathématique est une technique de traitement d'image, découverte par Georges Mathéron et Jean Serra à l'École des Mines de Paris (1960).**
- ❖ **La Morphologie Mathématique :**
  - Un ensemble de méthodes proposées pour le traitement de la forme des objets dans une image,
  - permet de supprimer le bruit introduit par des opérations de segmentation.
  - permet de nettoyer des images très bruitées.

# La morphologie mathématique

## Objectifs



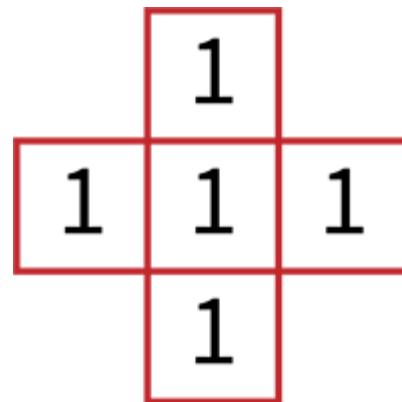
**La morphologie mathématique consiste à:**

- transformer géométriquement une image binaire par un élément structurant,
- traiter la forme des objets dans une image
- supprimer le bruit introduit par les opérateurs de segmentation.

# La morphologie mathématique

## Principes

◆ Le principe de la morphologie mathématique est fondé sur l'utilisation d'un élément structurant (ES) qui représente un masque de convolution appliqué à une image binaire.



Elément structurant

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Image binaire

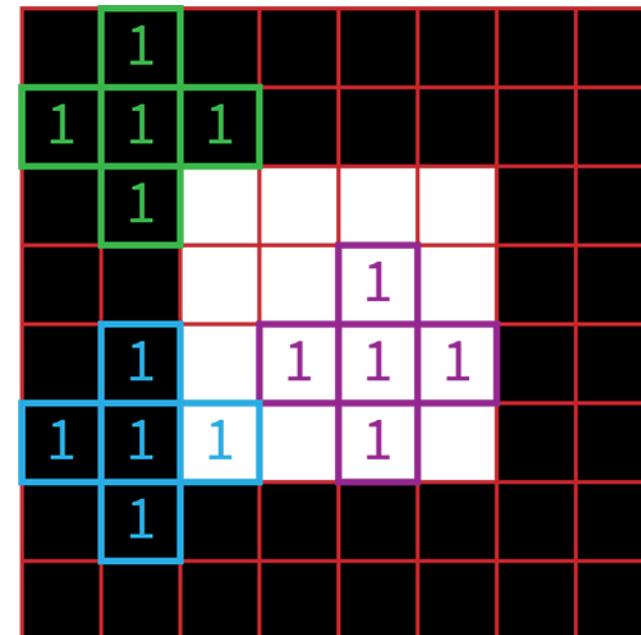
# La morphologie mathématique

## Élément Structurant (ES)



L'élément structurant sous forme d'image peut être utilisé en termes :

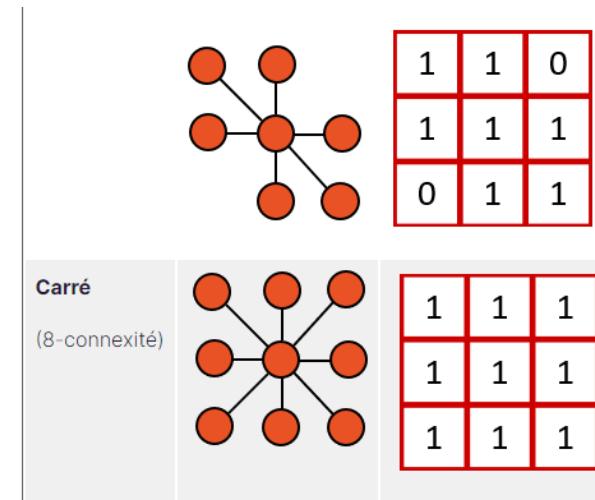
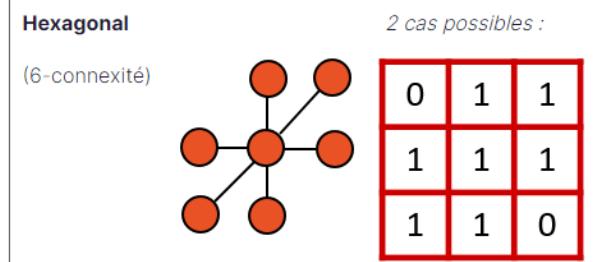
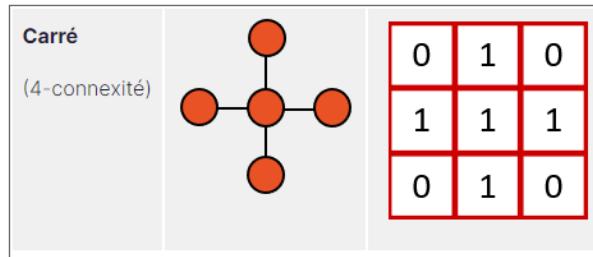
- D'exclusion (en vert) ;
- D'intersection (en bleu) ;
- Ou d'inclusion (en violet).



# La morphologie mathématique

## Élément Structurant (ES)

Il existe plusieurs sortes d'éléments structurants:



Deux critères sont importants pour choisir le masque de convolution :

- Le masque doit être capable de supprimer le bruit sans altérer l'information principale de l'image ;
- La taille du masque doit être raisonnable afin de limiter les temps d'exécution

# La morphologie mathématique

## Exemple



Image après segmentation



Image après segmentation et  
traitement morphologique

# Les opérations morphologies de base

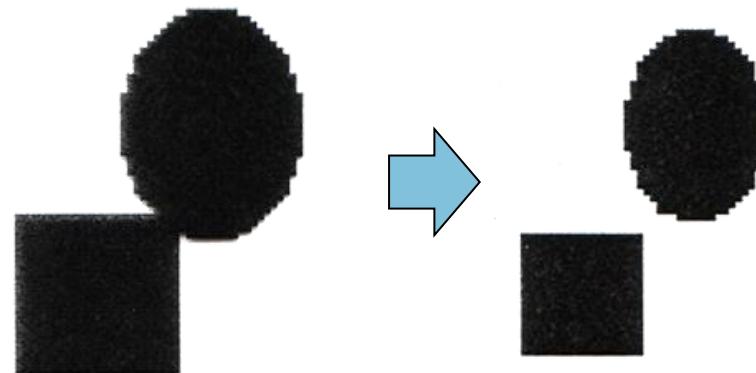
- ❖ On distingue deux types d'opérations morphologiques de base :
  - l'érosion;
  - la dilatation ;
- ❖ Ces opérations morphologiques sont des techniques duales.
- ❖ Ces opérations améliorent la qualité informationnelle d'une image numérique

# Les opérations morphologies de base

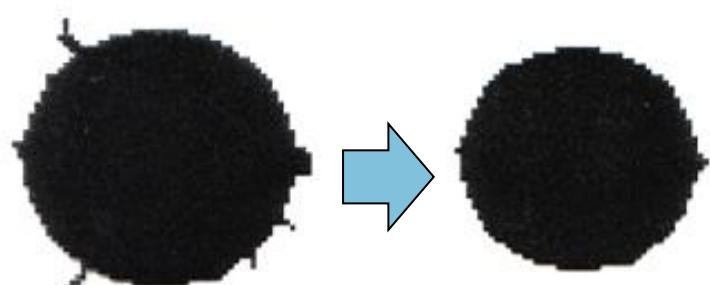
## L'érosion

◆ L'érosion est un processus qui permet de :

- séparer des objets qui sont collés.



- nettoyer la forme



# Les opérations morphologies de base

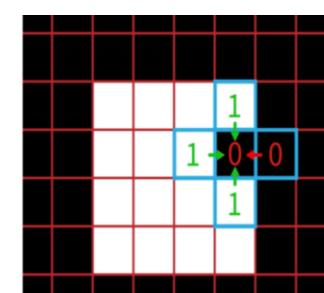
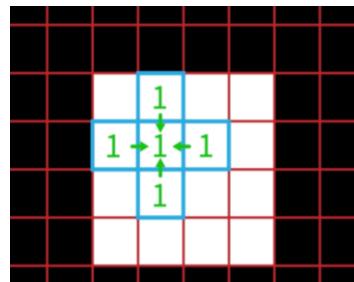
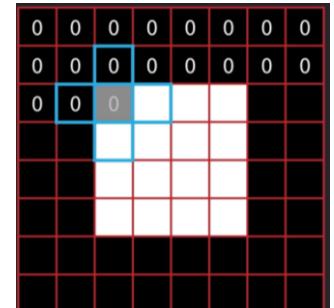
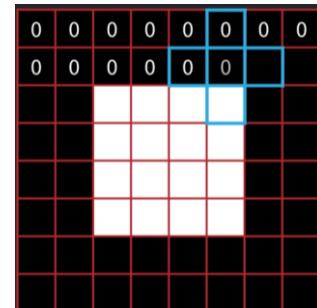
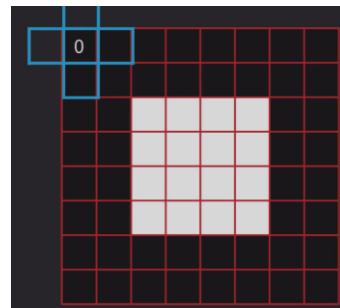
## L'érosion

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Élément Structurant

|   |   |   |
|---|---|---|
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 0 |

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

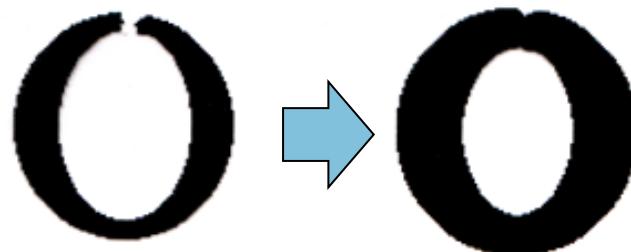


# Les opérations morphologies de base

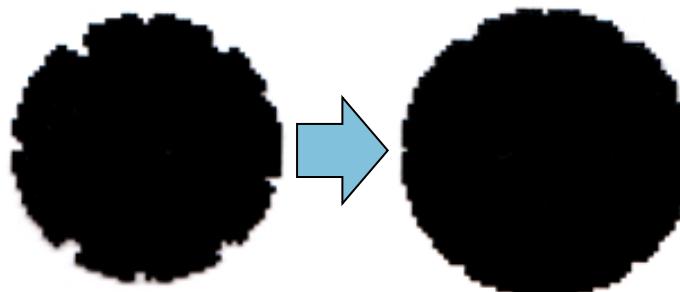
## La dilatation

❖ La dilatation est un processus qui permet de :

- réparer des traits interrompus.



- combler les intrusions (ou trous) dans un objet

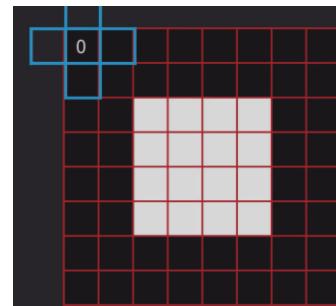


# Les opérations morphologies de base

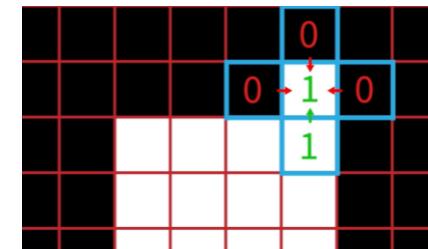
## La dilatation

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Élément Structurant



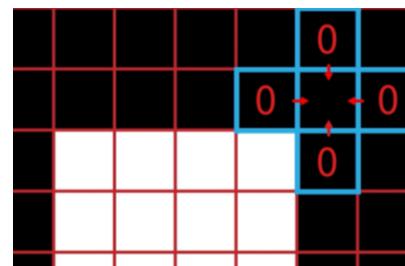
...



...

|   |   |   |
|---|---|---|
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 0 |

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |



...

# Les opérations morphologies de base

## Illustration : érosion & dilatation



Image d'origine.



Élément structurant  
 $V_4$ .



Dilatation.



Érosion.



Élément structurant



Dilatation.



Érosion.

# Les opérations morphologies de base

## érosion & dilatation sur image NG

Erosion :  $P_s(i,j) = \min \{v \in V(i,j)\}$

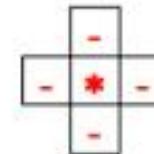
Dilatation :  $P_s(i,j) = \max \{v \in V(i,j)\}$

Erosion :

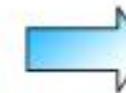
|   | n              |  |
|---|----------------|--|
| m | 115   91   77  |  |
|   | 95   68   90   |  |
|   | 55   151   210 |  |

Image de référence

$\Theta$



Élément structurant  
(4-connexité)



liste ordonnée des valeurs  
du voisinage :

68 , 90 , 91 , 95 , 151



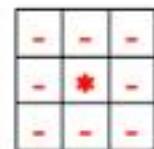
$(f \Theta B)(P) = 68$

Dilatation :

|   | n              |  |
|---|----------------|--|
| m | 115   91   77  |  |
|   | 95   68   90   |  |
|   | 55   151   210 |  |

Image de référence

$\oplus$



Élément structurant  
(8-connexité)



liste ordonnée des valeurs  
du voisinage :

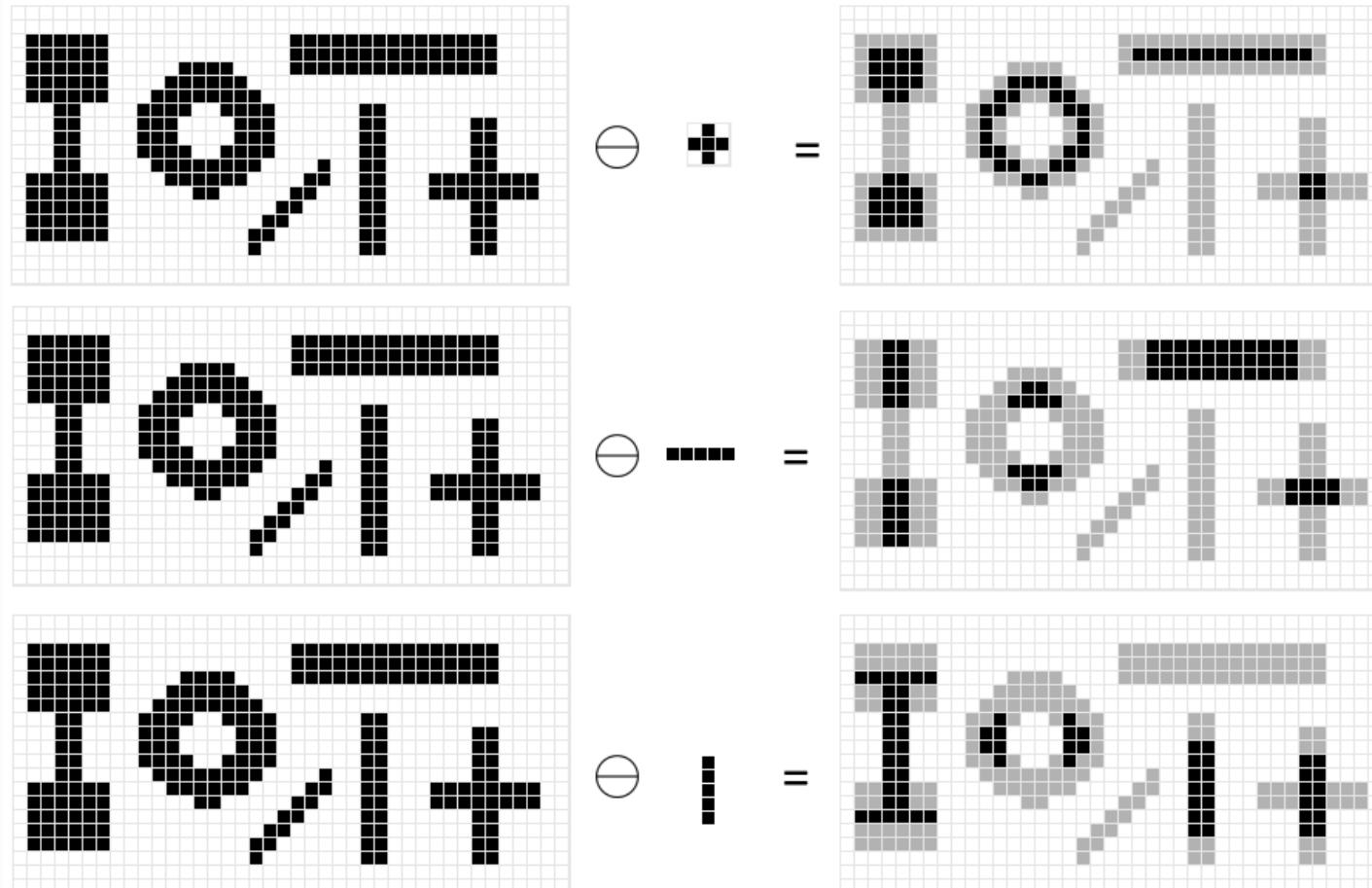
55 , 68 , 77 , 90 , 91 , 95 , 115 , 151 , 210



$(f \oplus B)(P) = 210$

# Les opérations morphologies de base

## Erosion sur image binaire



# Les opérations morphologies de base

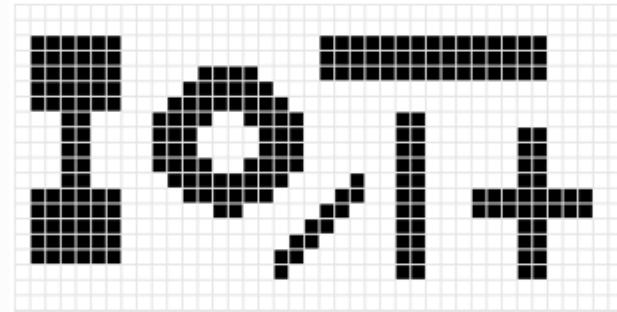
## Erosion sur image NG



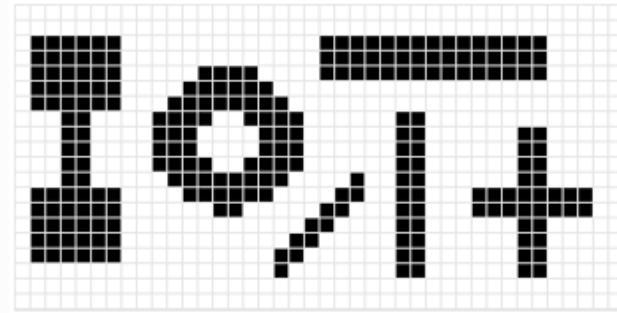
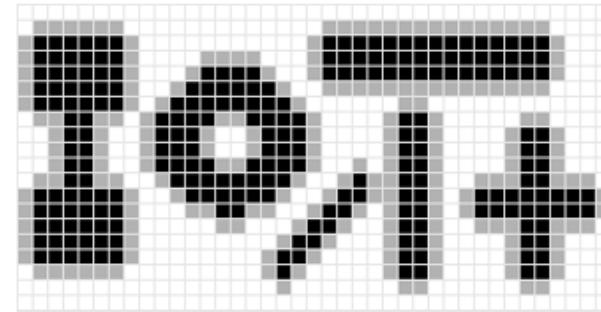
Erosion de l'image camera par un élément structurant circulaire, horizontal et vertical (de gauche à droite).

# Les opérations morphologies de base

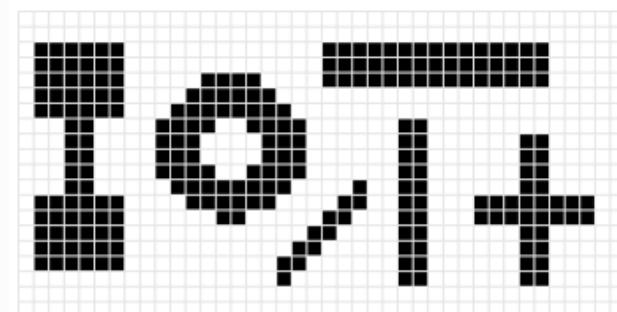
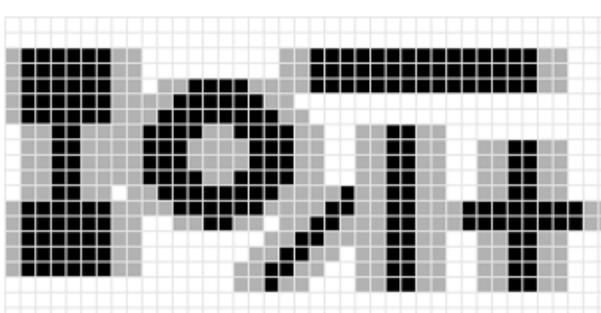
## Dilatation sur image binaire



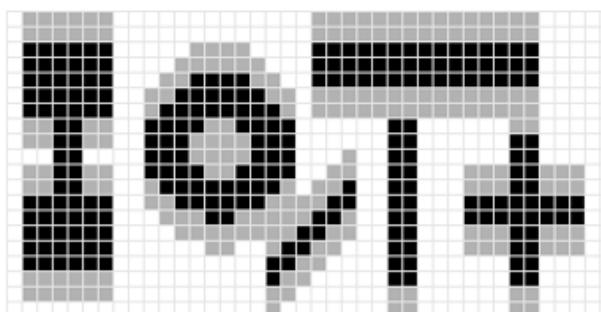
$$\oplus \quad + =$$



$$\oplus \quad - - - =$$



$$\oplus \quad | =$$



# Les opérations morphologies de base

## Dilatation sur image NG



Dilatation de l'image camera par un élément structurant circulaire, horizontal et vertical (de gauche à droite).

# Les opérations morphologies de base

## érosion & dilatation sur image NG

◆ La dilatation en niveaux de gris accroît la luminance des pixels entourés de voisins plus lumineux

◆ L'érosion en niveaux de gris réduit la luminance des pixels qui sont entourés de voisins de moindre intensité.



Dilatation



Érosion

# **Les opérations morphologies de haut niveau**

- ❖ On distingue deux types d'opérations qui découlent de la morphologie mathématique :
  - l'Ouverture;
  - la Fermeture ;
- ❖ Ces deux opérateurs aboutissent sur une implémentation du Gradient Morphologique.
- ❖ Le Gradient Morphologique consiste à extraire les contours d'une image binaire

# Les opérations morphologies de haut niveau

## L'Ouverture



L'ouverture est représentée par :

$$A \circ S = (A \ominus S) \oplus S$$

- L'ouverture est une opération qui consiste en une érosion suivie d'une dilatation

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

# Les opérations morphologies de haut niveau

## La fermeture



La fermeture est représentée par :

$$A \bullet \breve{S} = (A \oplus \breve{S}) \ominus \breve{S}$$

- La fermeture est une opération qui consiste en une dilatation suivie d'une érosion.

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

# Les opérations morphologies de base

## Illustration : ouverture & fermeture



Image d'origine.



Élément structurant  
 $V_4$ .



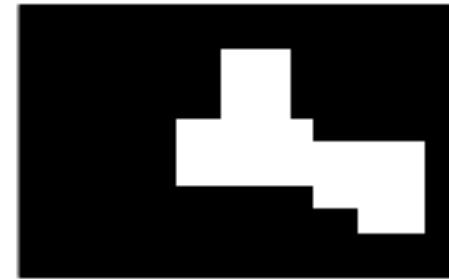
Ouverture.



Fermeture.



Élément structurant



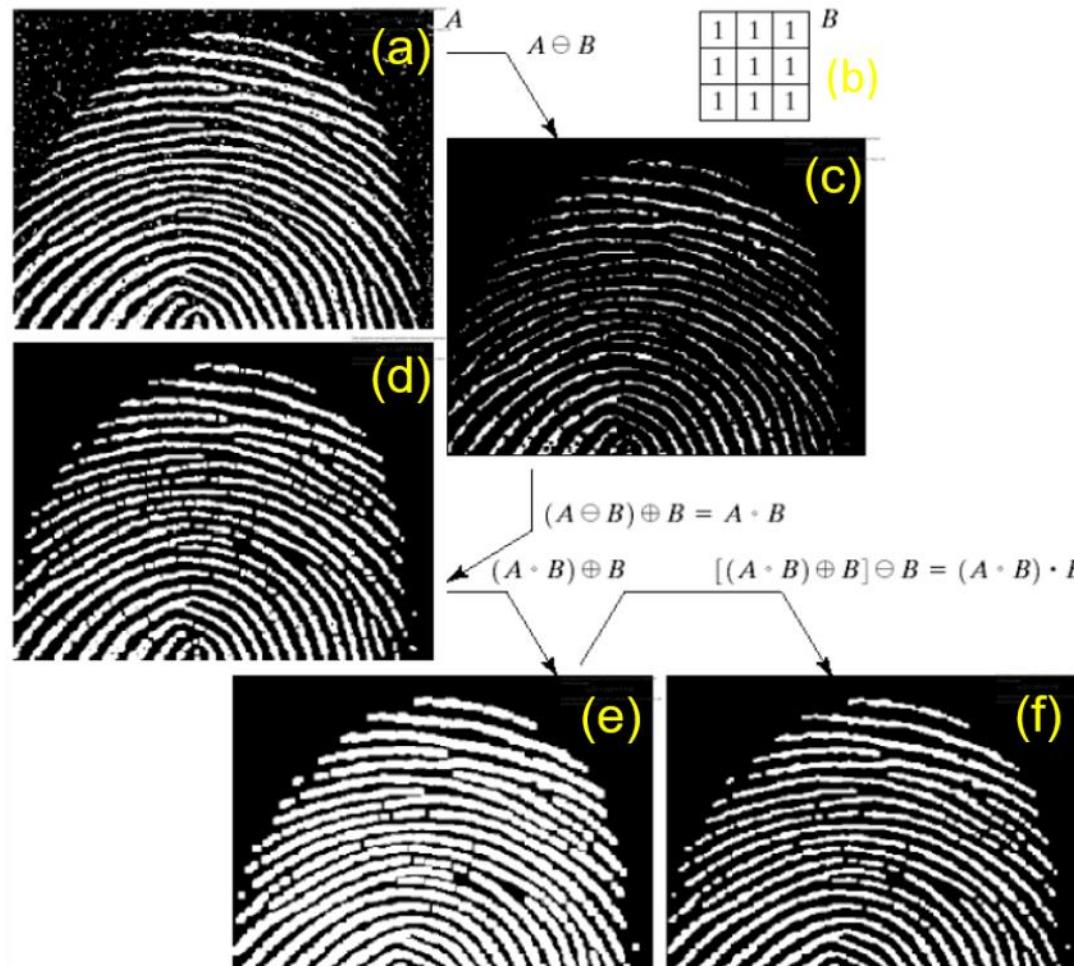
Ouverture.



Fermeture.

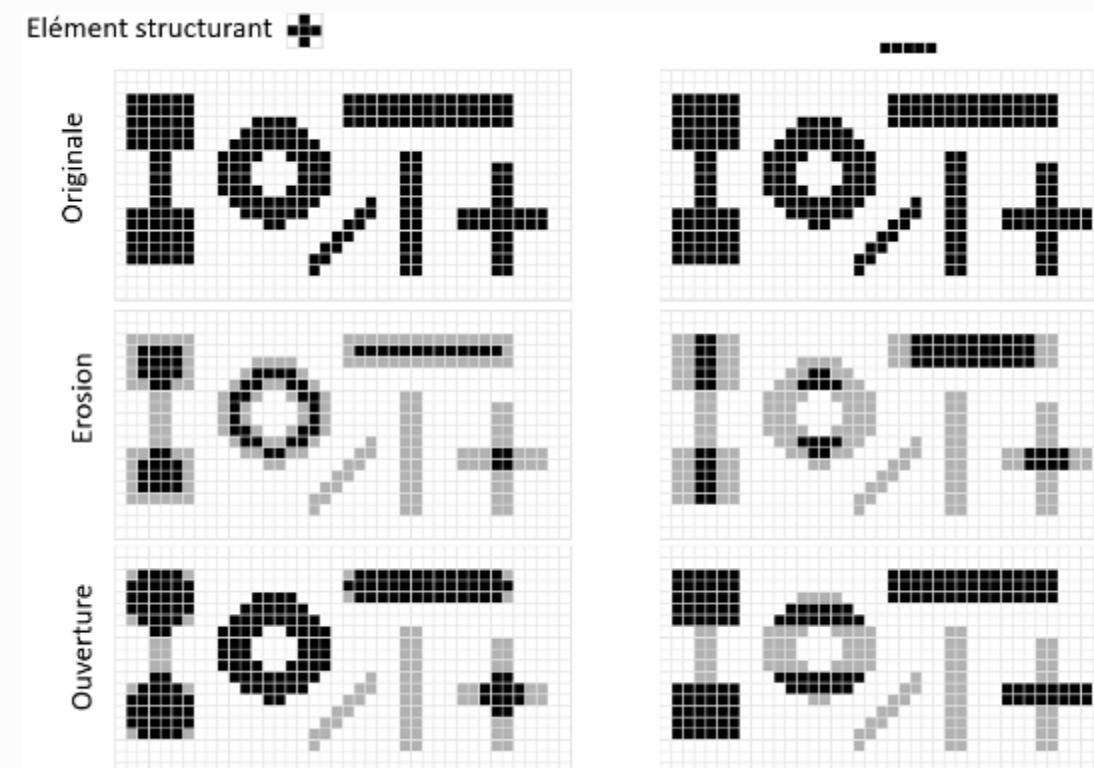
# Les opérations morphologies

## Exemple



# Les opérations morphologies de haut niveau

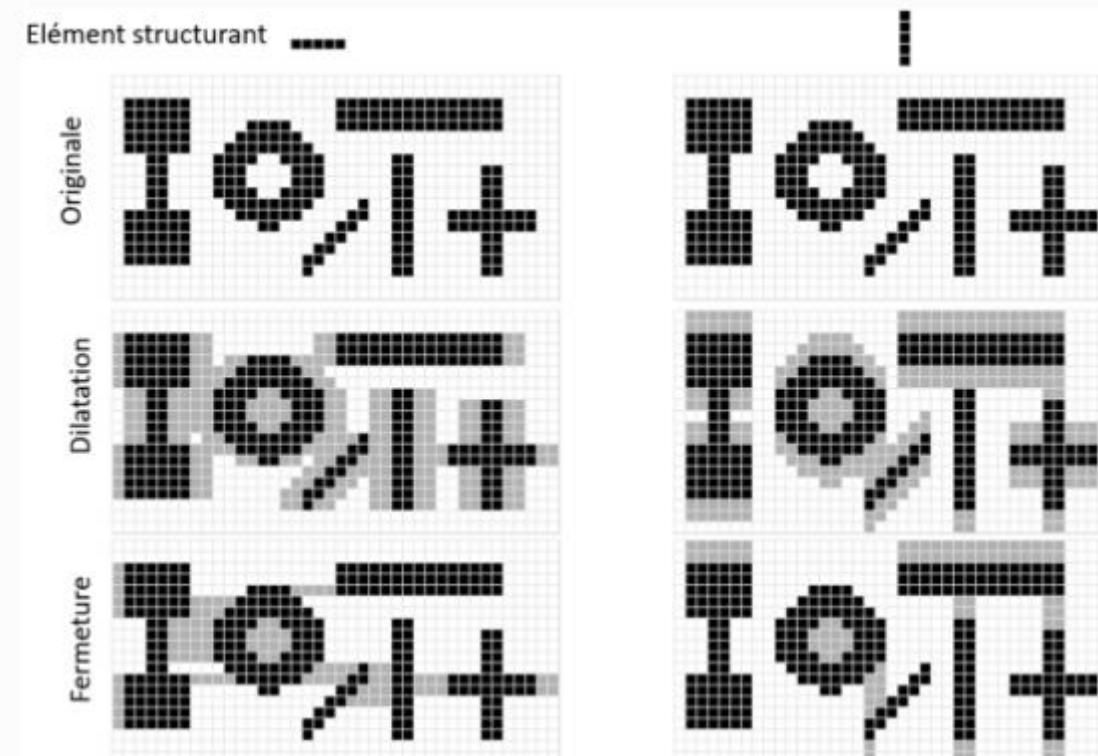
## L'ouverture sur image NG



→ L'opération d'ouverture a supprimé les éléments dans lequel il ne pouvait pas tenir entièrement.

# Les opérations morphologies de haut niveau

## La fermeture sur image NG



→ L'opération de fermeture a rempli les espaces vides dans lequel il ne pouvait pas tenir entièrement.

# Les opérations morphologies de haut niveau

## La fermeture sur image NG



Ouverture sur l'image camera



Fermeture sur l'image camera

# Les opérations morphologies

## Exemple : image NG



Dilatation



Ouverture



Erosion



Fermeture

# Les opérations morphologies de haut niveau

## Gradients Morphologiques

- ◆ Le gradient morphologique est utilisé afin d'extraire le contour d'un objet dans une image.
- ◆ Il existe 2 types de gradient morphologique :
  - Le gradient par érosion ;  $G^- = u - E(u,b)$
  - Le gradient par dilatation.  $G^+ = D(u,b) - u$
- ◆ Le gradient par érosion consiste à faire la différence entre l'image d'origine et l'image érodée
- ◆ Le gradient par dilatation consiste à faire la différence entre l'image dilatée et l'image d'origine :

# Les opérations morphologies de haut niveau

## Gradients Morphologiques

Gradient morphologique interne

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Gradient morphologique externe

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Gradient morphologique symétrique

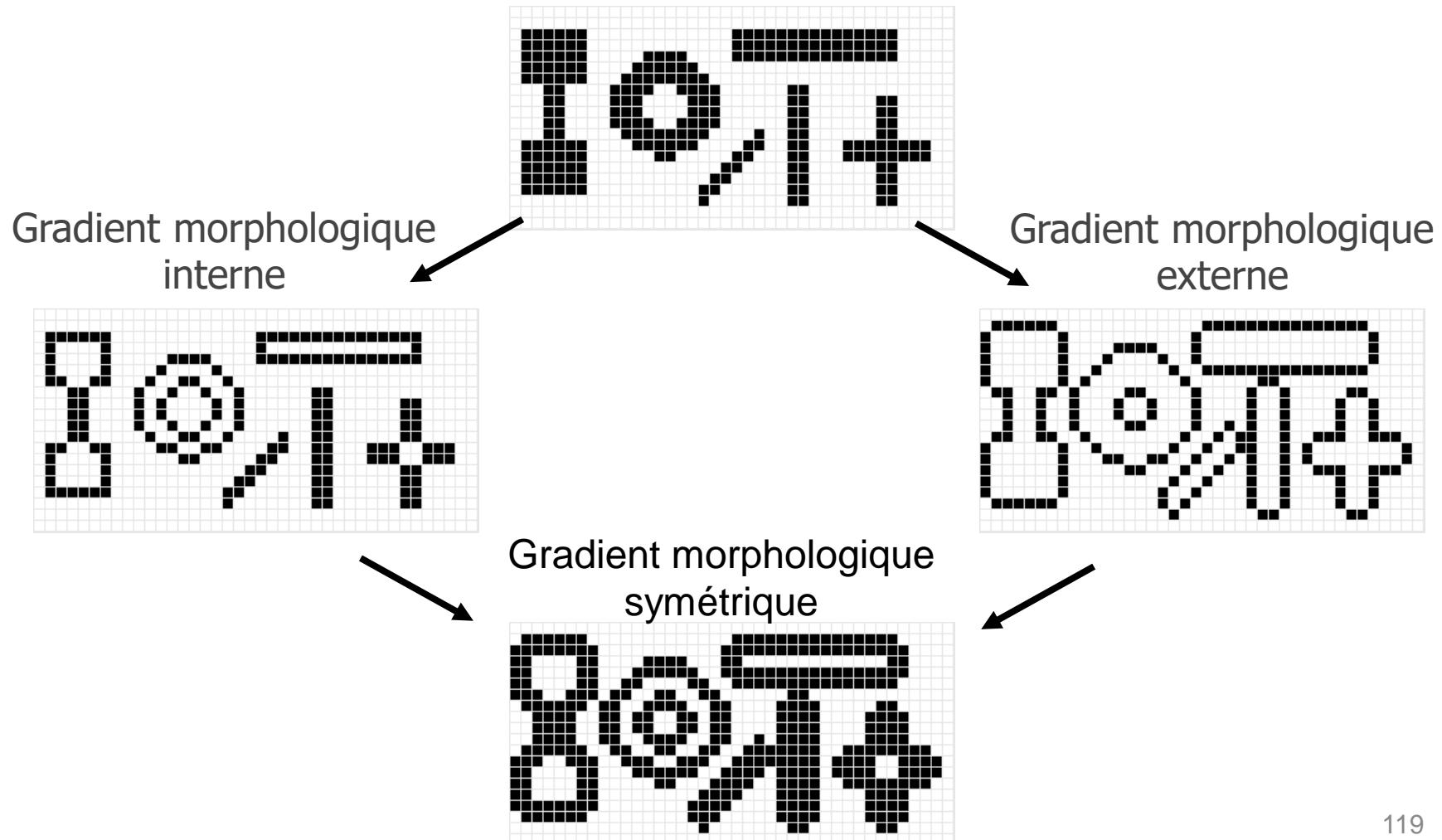
|   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

$$g^-(X) = X \setminus (X \oplus B)$$

$$g^+(X) = (X \ominus B) \setminus X$$

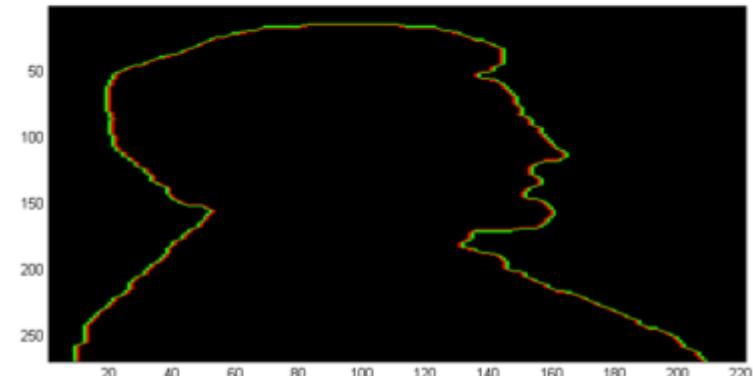
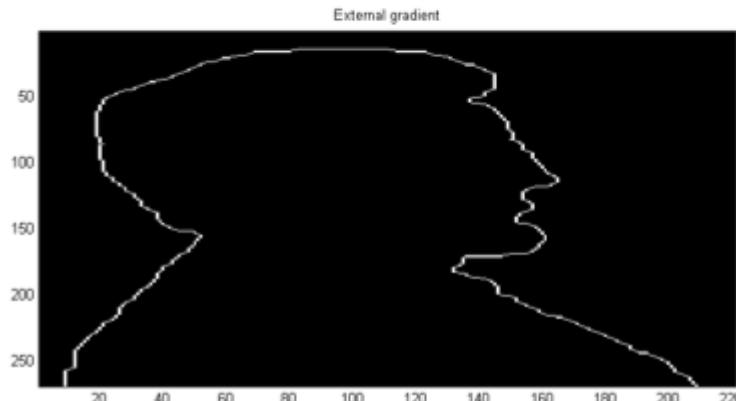
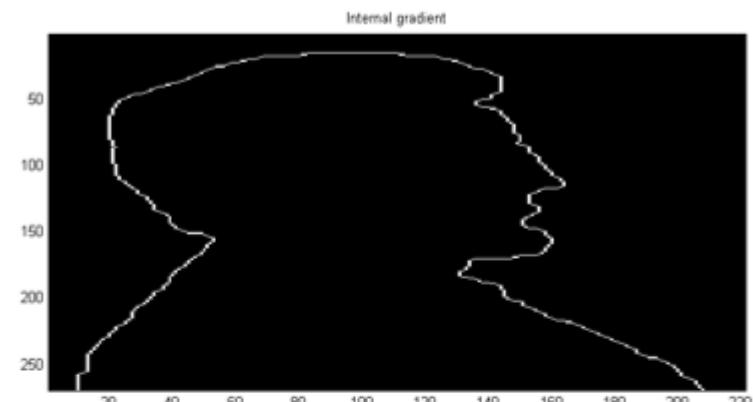
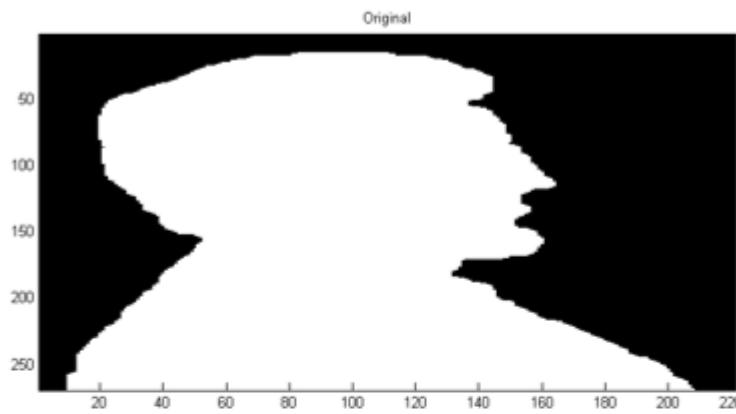
# Les opérations morphologies de haut niveau

## Gradients Morphologiques



# Les opérations morphologies de haut niveau

## Gradients Morphologiques

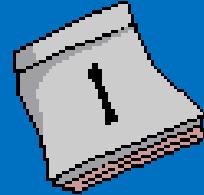


# Les opérations morphologies de haut niveau

## Gradients Morphologiques sur image NG



# **Chapitre**



**Introduction  
à la qualité des données**

- ◆ **Introduction**
- ◆ **Importance de la qualité des données**
- ◆ **Évaluation Subjective versus Objective de la qualité**
- ◆ **Évaluation objective de la qualité**
  - ◆ **Classes**
  - ◆ **MSE et PSNR**
  - ◆ **SSIM**

# **Validation d'un système de vision par ordinateur**

- ◆ **La validation des systèmes de vision par ordinateur se base principalement sur leurs performances en vue de:**
  - ◆ Classifier un objet.
  - ◆ Identifier une personne
  - ◆ Segmenter une scène
  - ◆ Reconstruire une scène
  - ◆ Détection d'objets
  - ◆ ...
- ◆ **Les performances des systèmes de vision par ordinateur sont grandement affectées par la qualité des données collectées.**

# Importance de la qualité des données

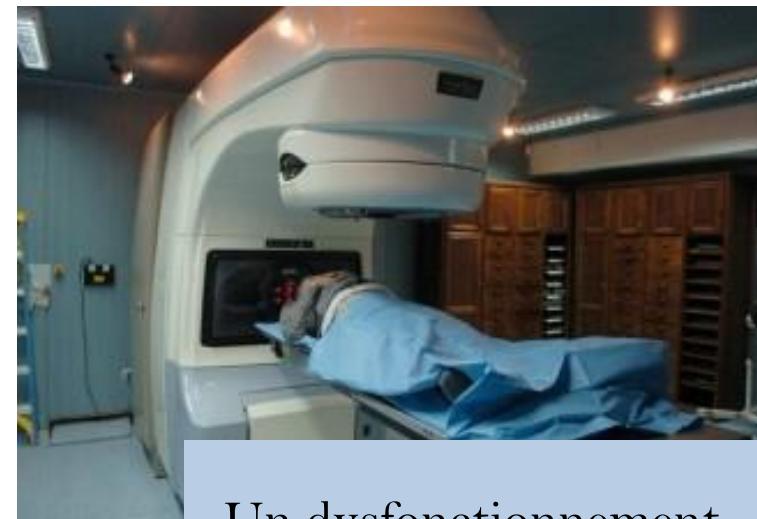
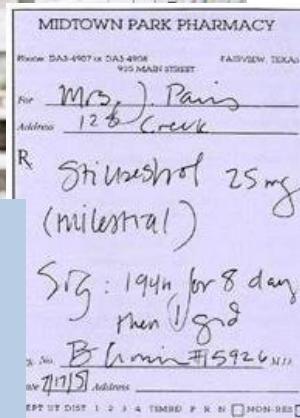
- ◆ La faible qualité de données est l'un des problèmes les plus critiques pour les consommateurs d'informations distribuées par des sources autonomes
- ◆ Toute la chaîne d'un système d'aide à la prise de décision, depuis l'acquisition des données jusqu'aux la prise de décision.
- ◆ Les conséquences de la non-qualité des données, ou de leur qualité médiocre, sur les prises de décision sont considérables et présentent des effets désastreux

# Importance de la qualité des données

## Altération de la fiabilité des systèmes



Les prescriptions pharmaceutiques écrites à la main par les médecins



Un dysfonctionnement du système médical

Explosion d'une navette spatiale à cause des informations incomplètes et confuses



# Importance de la qualité des données

→ **La qualité joue un rôle aussi important que la valeur en elle-même de l'information**

❖ Il n'est plus question de « laisser-faire avec », mais il est plutôt urgent de proposer **des solutions théoriques et pratiques aux multiples problèmes de qualité des données**

# Définitions de la qualité des données

◆ **Le besoin de l'évaluation de la qualité des données est clair et de nombreux chercheurs ont définis, chacun de sa manière, le concept de qualité**

1

*"The totality of features and characteristics of a product or service that bear on its ability to satisfy stated or implied needs."*

International Organization for Standardization (ISO), 1986

**Qualité = Satisfaction de besoins**

# Définitions de la qualité des données

2

*"Degree to which a set of inherent characteristics fulfills requirements."*

*"characteristic"* est défini comme *"distinguishing feature"* et  
*"Requirement"* comme *"need or expectation that is stated, generally implied or obligatory"*

International Organization for Standardization (ISO), 2005

Définition plus générale et peut être appliquée à n'importe quelle entité

# Définitions de la qualité des données

3

*"fitness for use."*

Cette définition de la qualité, proposée par Joseph Juran,  
suppose que la qualité d'un produit est son aptitude à l'usage  
pour lequel il est destiné.

# Définitions de la qualité des données

4

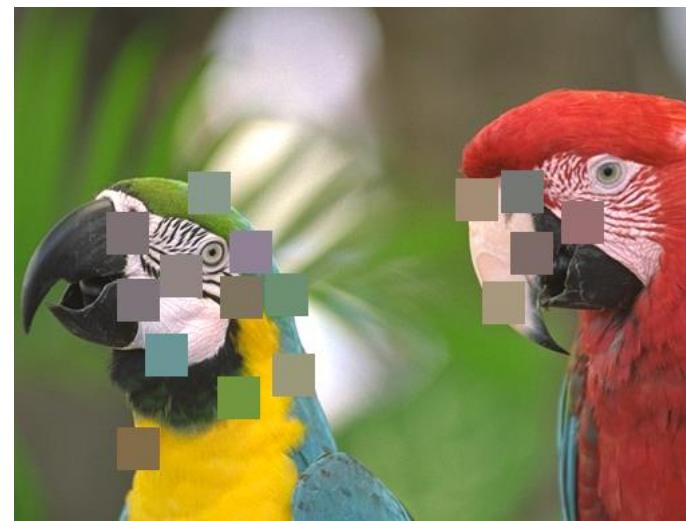
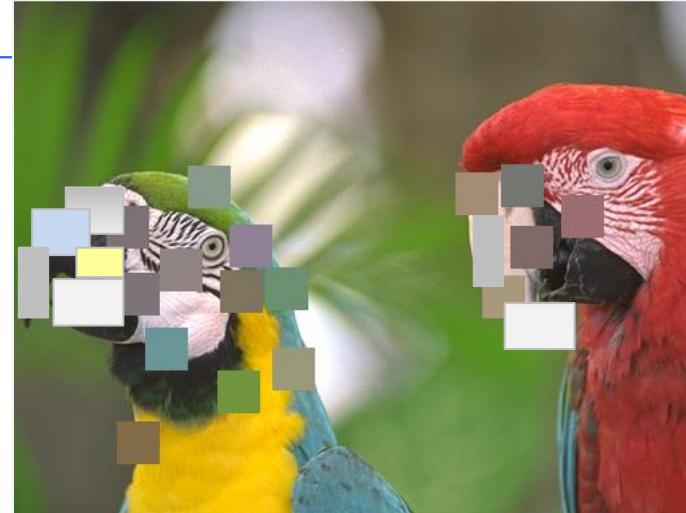
*" The fitness for use of information".*

- 1. La qualité de l'information dépend de la tâche.** Un utilisateur peut considérer la qualité d'une information appropriée pour une tâche mais pas suffisante pour une autre tâche.
- 2. La qualité de l'information est subjective,** car un deuxième utilisateur moins soucieux de la qualité peut considérer la qualité de la même information appropriée pour les deux tâches.

# Réflexion



# Réflexion



# Réflexion



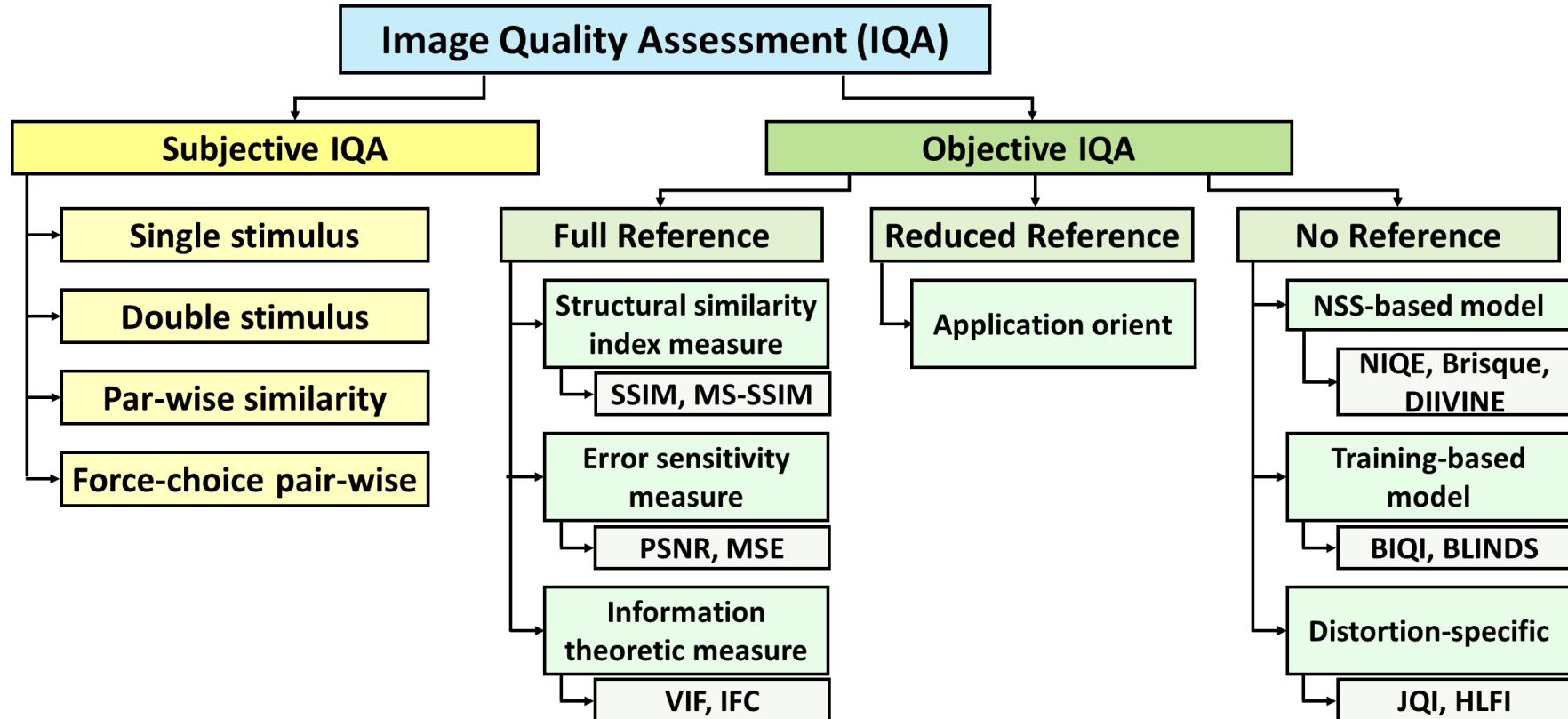
# Importance de la qualité des données

- ◆ Une approche universelle d'évaluation de la qualité de données pour des contexte différents n'existe pas.
- ◆ Dans chaque contexte, un ensemble d'indicateurs de qualité doit être défini,
- ◆ Ces indicateurs de qualité sont transformés en critères d'évaluation de la qualité.
- ◆ Les indicateurs de qualité sont issus d'une analyse a priori du contexte de l'application.

# Objectives

- ◆ **Comprendre les concepts fondamentaux de l'évaluation de la qualité des images**
- ◆ **Se familiariser avec le concept d'évaluation de la qualité**
- ◆ **Apprendre les composants d'une mesure de qualité objective efficace**
- ◆ **Se familiariser avec les diverses méthodes pour exécuter des tests subjectifs**
- ◆ **Apprendre les différentes méthodologies pour valider les mesures de qualité**

# Évaluation Subjective versus Objective de la qualité



# Les approches subjectives

- ◆ Les approches subjectives d'évaluation de la qualité des images sont reconnues en tant qu'une manière conventionnelle pour mesurer la qualité des images.
- ◆ Ces approches se basent dans leurs évaluations de la qualité sur l'opinion des observateurs humains (Human Visual System (HVS)), qui donnent un score moyen d'opinion (MOS) sur une échelle de 1 à 5.



# Les approches subjectives

## Visualisation & Évaluation par l'observateur



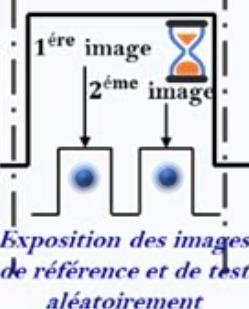
## Prise de décision



Stimulus unique (SS)

Stimulus double (DS)

## Visualisation & Évaluation par l'observateur



## Méthodes Subjectives

## Visualisation & Évaluation par l'observateur



## Prise de décision

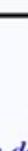
Sélection de l'image de meilleure qualité



Choix par force

Similarité par paires

## Visualisation & Évaluation par l'observateur



## Prise de décision



# Les approches objectives



## Les dégradations affectant la qualité d'image:

- ◆ Le flou
- ◆ La distorsion générée suite à une transformation géométrique
- ◆ Erreur de transmission
- ◆ Artéfacts suite à la compression

# Les approches objectives

## Full-reference IQA

- ◆ Technique de mesure de la qualité : Il existe de nombreuses techniques de qualité d'image largement utilisées pour évaluer la qualité des images telles que
  - ◆ MSE (Mean Square Error),
  - ◆ UIQI (Universal Image Quality Index),
  - ◆ PSNR (Peak Signal to Noise Ratio),
  - ◆ SSIM (Structured Similarity Index Method) ,
  - ◆ FSIM (Feature Similarity Index Method),
  - ◆ etc

# Les approches objectives

## Full-reference IQA : MSE

◆ **MSE (Mean Square Error): l'erreur quadratique moyenne** est l'estimateur le plus utilisé des métriques de mesure de la qualité d'image.

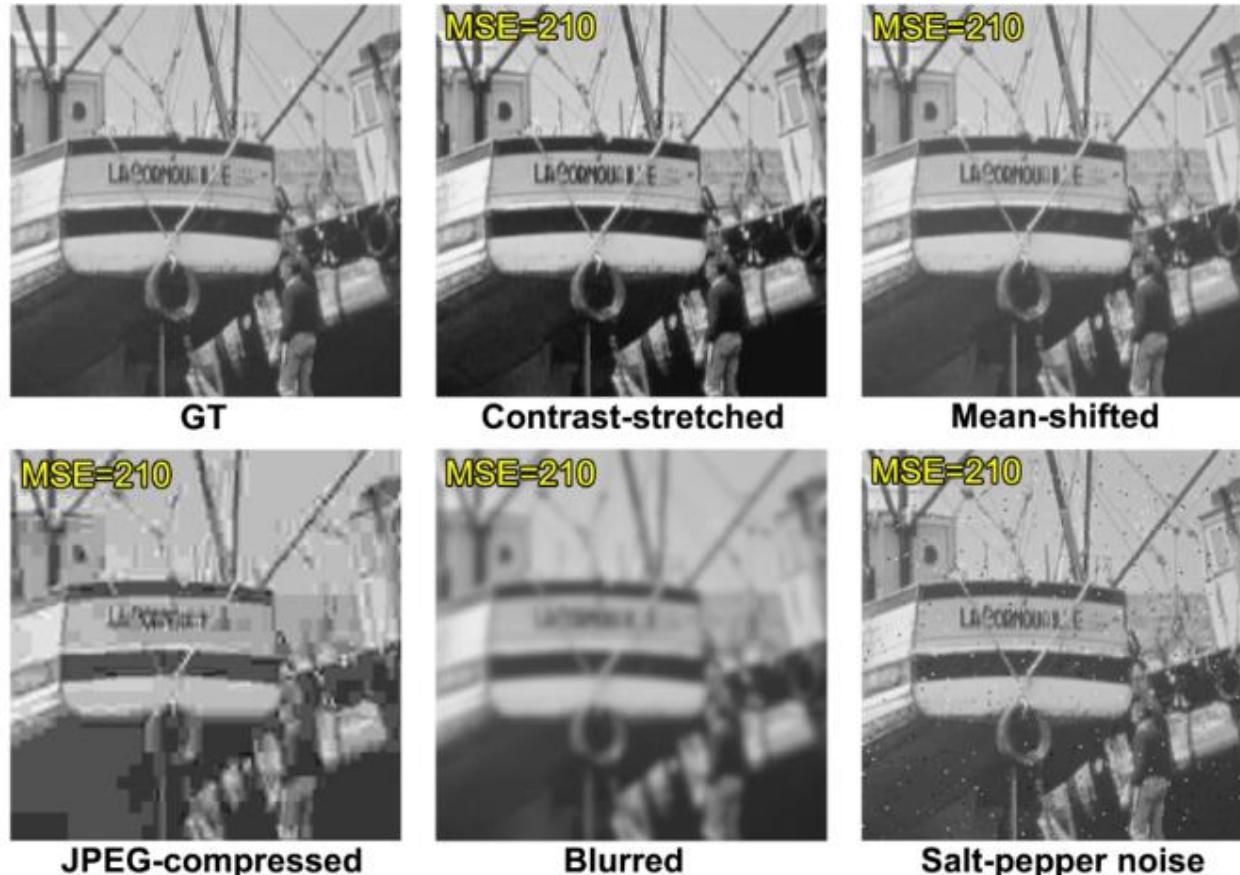
◆ Il s'agit du deuxième moment de l'erreur.

$$MSE = \frac{1}{m n} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I(i, j) - K(i, j)]^2$$

◆ Où  $(m \times n)$  est la taille de l'image, et  $I(i,j)$  et  $K(i,j)$  sont respectivement les amplitudes de pixel sur les images originale et dégradée.  
◆ les valeurs proches de zéro sont les meilleures.

# Les approches objectives

## Full-reference IQA : MSE



Comparaison d'images de "bateaux" avec différents types de distorsions,  
toutes avec  $MSE=210$

# Les approches objectives

## Full-reference IQA : PSNR

- ◆ **PSNR (Peak Signal to Noise Ratio):** déterminer le niveau de distorsion d'une image compressée par rapport à sa source.
- ◆ Au lieu de mesurer la distorsion, cette valeur mesure la fidélité, puisqu'elle est proportionnelle à la qualité.

$$PSNR = 10 \log_{10} \left( \frac{I_{max}^2}{MSE} \right)$$

- ◆ Pour une image à niveau de gris,  $I_{max}$  désigne la luminance maximale possible. Une valeur de PSNR infinie correspond à une image non dégradée, et cette valeur décroît en fonction de la dégradation. Le PSNR lie le MSE à l'énergie maximale de l'image.

# Les approches objectives

## Full-reference IQA : SSIM

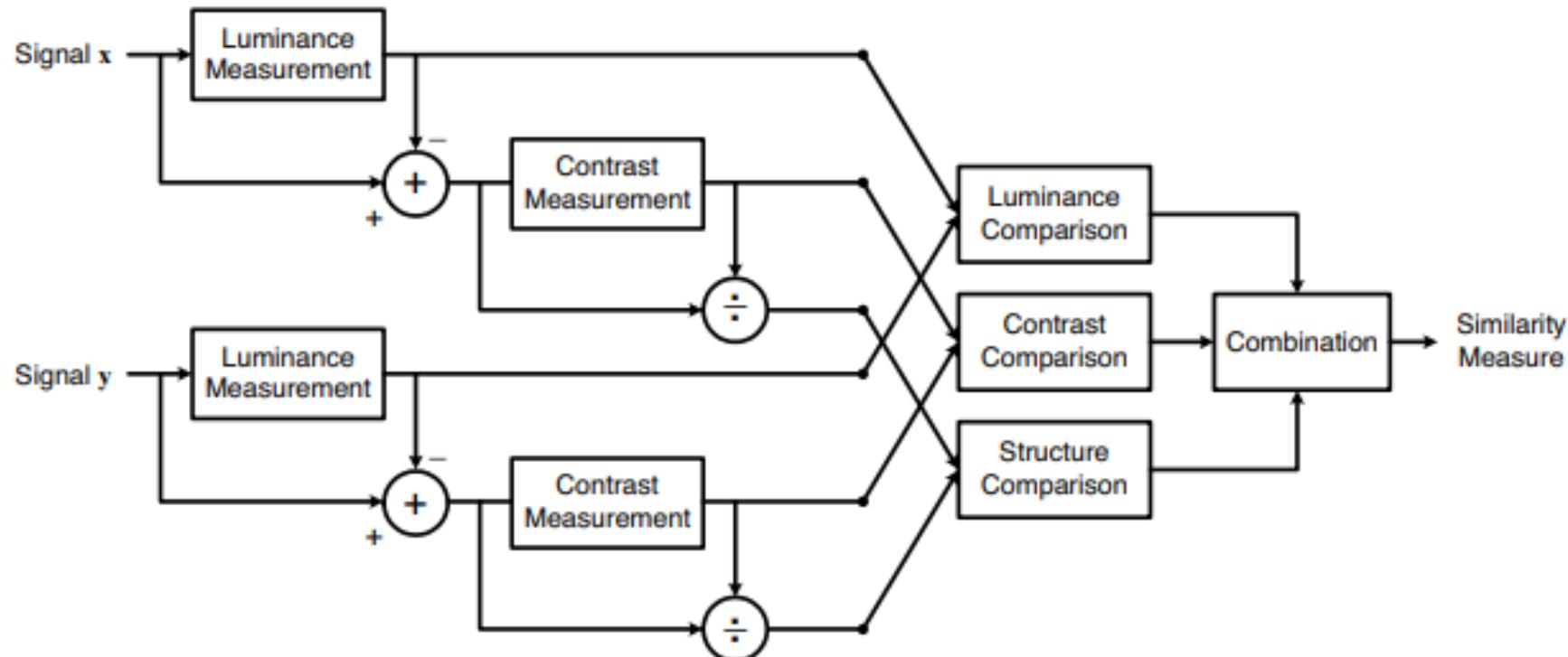
◆ **SSIM (Structured Similarity Index Method)**: détermine la similarité structurelle des images, avec pour but d'être un peu plus réaliste que le PSNR.

$$\text{SSIM}(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)}$$

- ◆ Son principe général repose sur les statistiques.
- ◆ SSIM comporte trois mesures selon les changements de **contraste**, de **luminosité** et de **structure** entre l'image original et l'image déformée.
- ◆ Il est à noter que SSIM fournit à la fois une mesure de qualité comprise entre **0 (qualité basse)** et **1 (qualité haute)** et une carte des déformations associée à l'image déformée observée.

# Les approches objectives

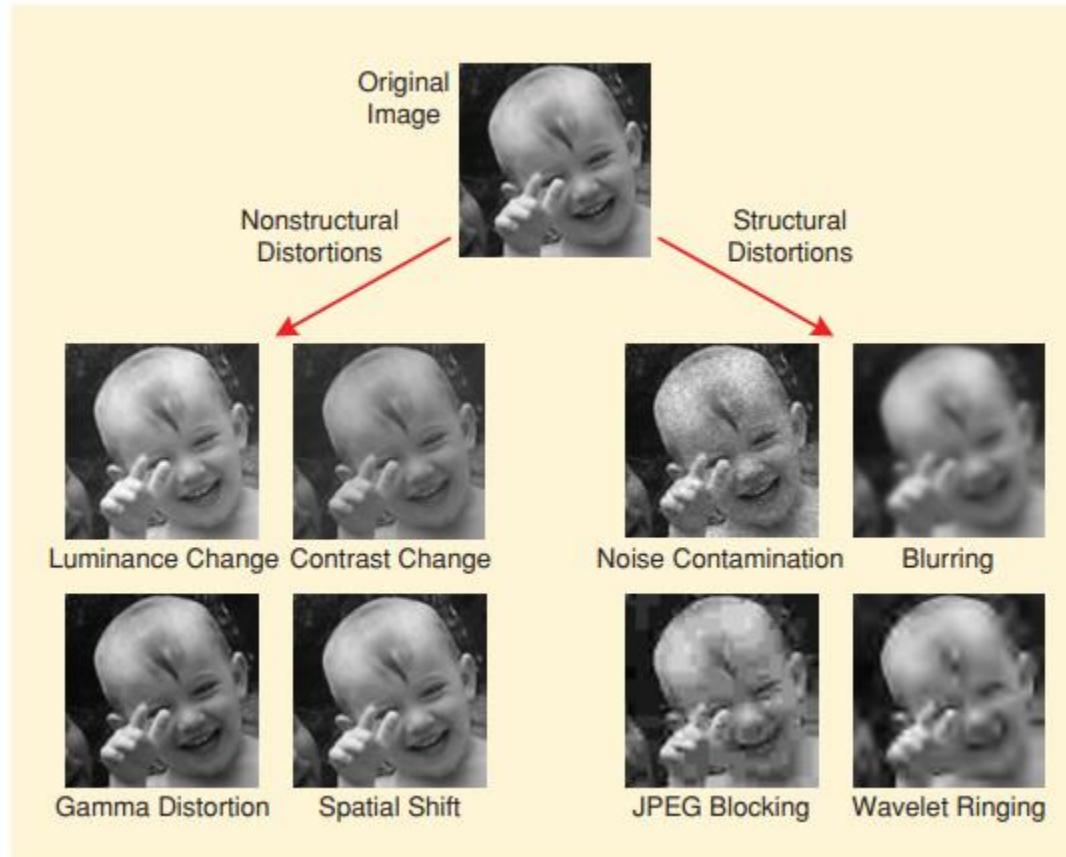
## Full-reference IQA : SSIM



Z. Wang, A. C. Bovik, H. Rahim Sheikh, and E. P. Simoncelli, "[Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity](#)", 2004.

# Les approches objectives

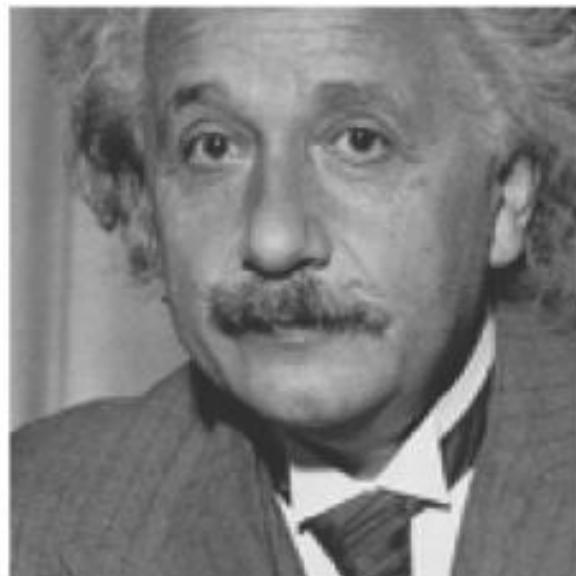
## Full-reference IQA : SSIM



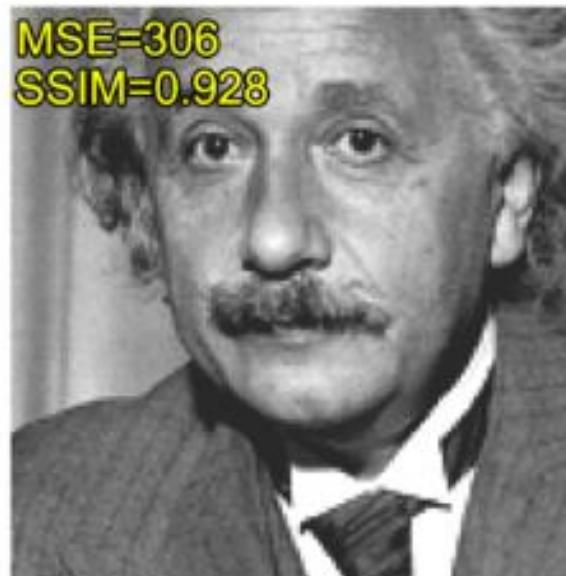
Exemples de distorsions structurelles et non structurelles

# Les approches objectives

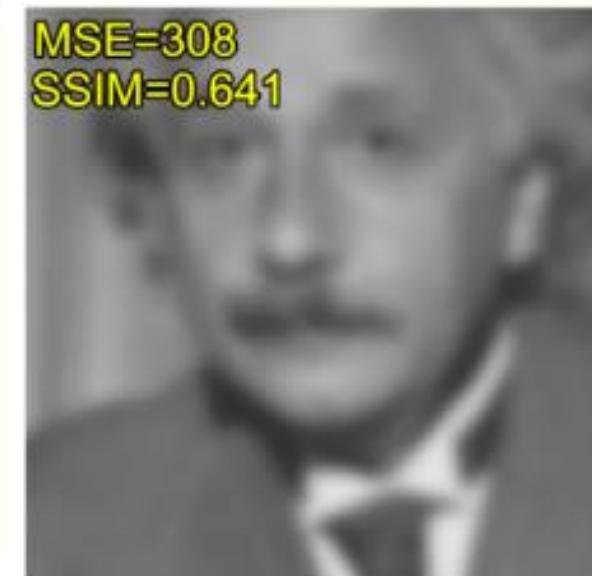
## Full-reference IQA : SSIM



GT



Mean-shifted

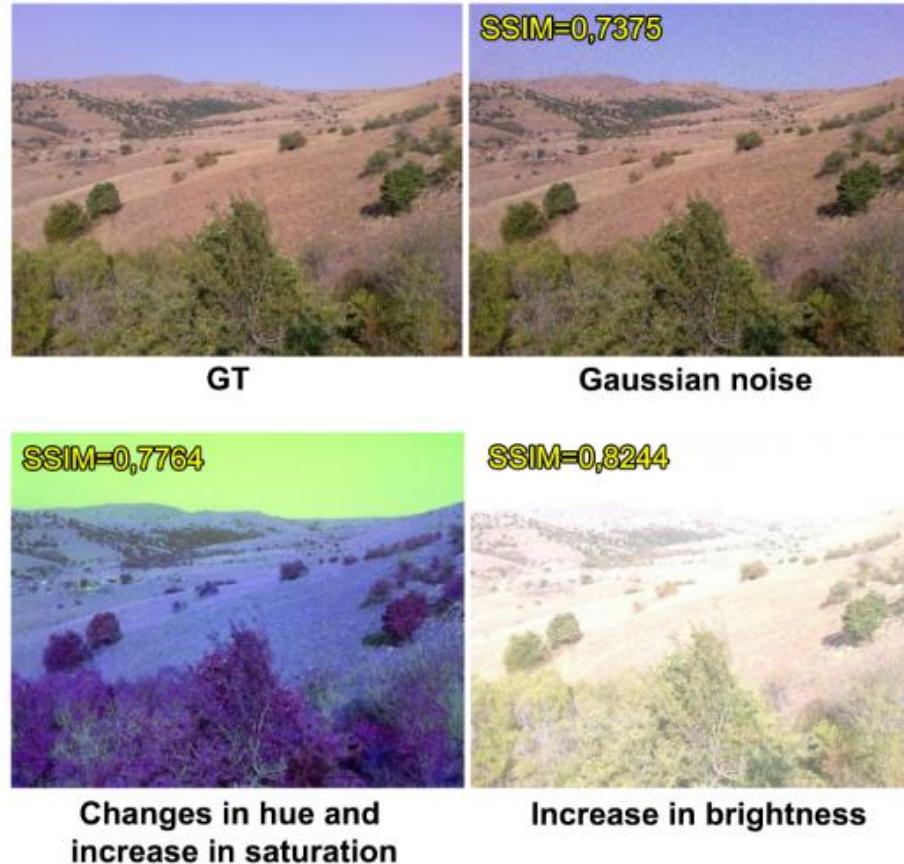


Blurred

Comparaison d'images "Einstein" avec différents types de distorsions et presque le même MSE

# Les approches objectives

## Full-reference IQA : SSIM



Comparaison d'images "de collines" avec différents types de distorsions ayant le même SSIM

# Les approches objectives

## Full-reference IQA : SSIM



SSIM=0.89



SSIM=0.77



Faking cat



SSIM=0.95

GT



Faking face

SSIM=0.87

Adding noise



Adding noise

# Les approches objectives

## Full-reference IQA

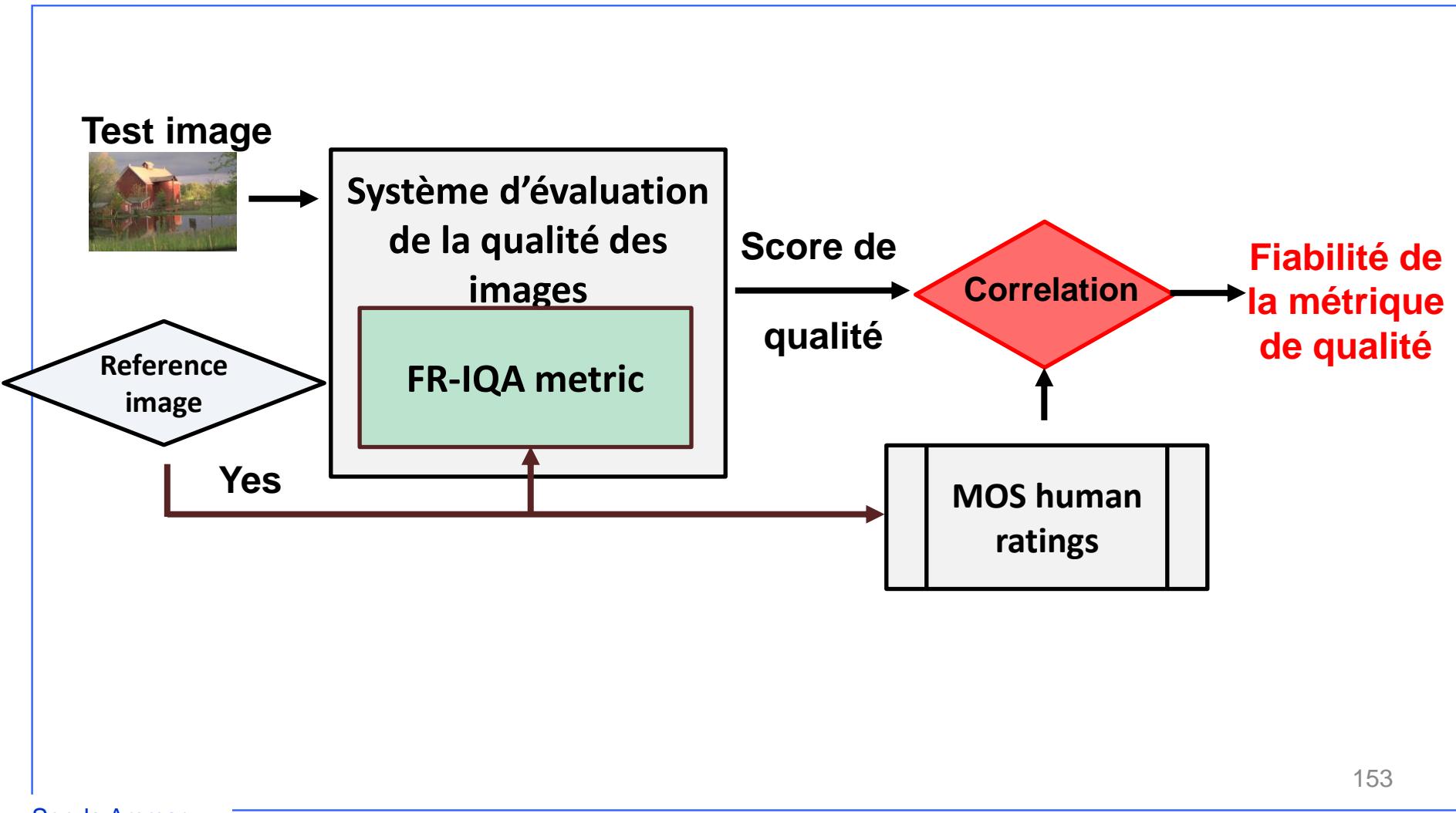
- ◆ SSIM permet de:
  - ♣ estimer des distorsions dépendantes du contenu
  - ♣ capter le bruit
  - ♣ capture de flou
- ◆ mais ne peut pas être appliqué pour :
  - ♣ capturer les rotations et les déplacements spatiaux
  - ♣ capturer les changements de luminosité, de contraste, de teinte et de saturation

# Les approches objectives

## Full-reference IQA

- ◆ Le PSNR permet de :
  - ♣ tester différentes stratégies d'optimisation de codec conçues pour maximiser la qualité subjective d'un contenu spécifié (c'est-à-dire que le contenu reste le même entre les optimisations)
  - ♣ capter le bruit
  - ♣ capturer les changements de luminosité, de contraste, de teinte et de saturation
- ◆ mais ne peut pas être appliqué à:
  - ♣ estimation des distorsions dépendantes du contenu
  - ♣ capture de flou
  - ♣ tester différentes qualités de codec lorsque le contenu ne reste pas le même entre les tests
  - ♣ capturer les rotations et les déplacements spatiaux

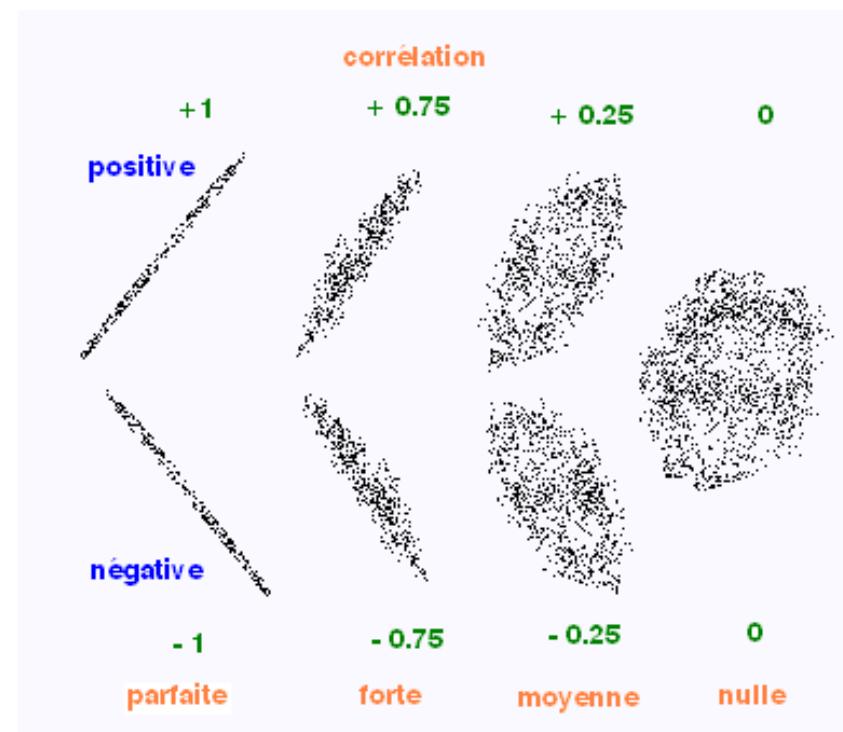
# Évaluation des approches objectives



# Évaluation des approches objectives

## La corrélation

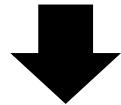
- ◆ La corrélation est une mesure qui reflète la **relation** entre deux variables.
- ◆ Le coefficient de corrélation quantifie le degré de changement d'une variable en fonction du changement de l'autre variable.
- ◆ En statistique, la corrélation est liée au concept de dépendance, qui est la relation statistique entre deux variables



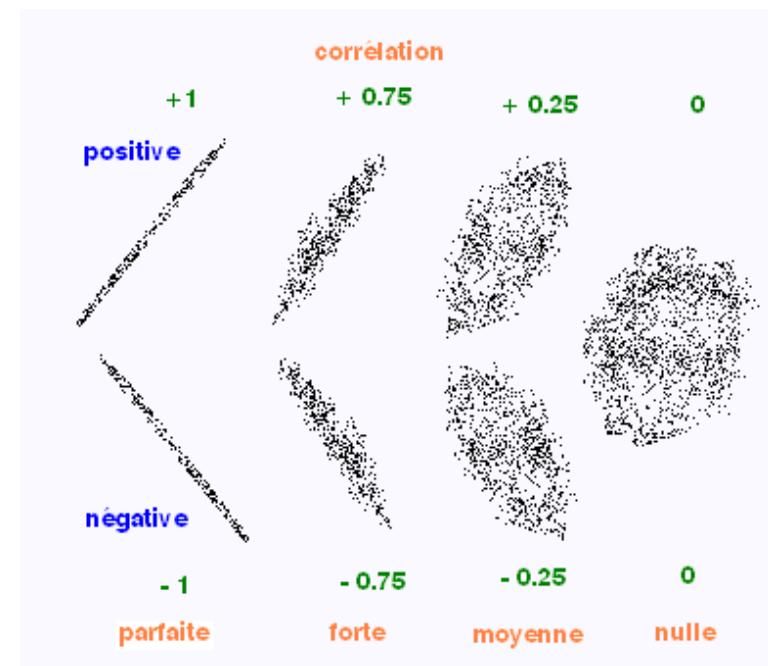
# Évaluation des approches objectives

## La corrélation

|                |      |       |      |      |      |      |      |      |     |
|----------------|------|-------|------|------|------|------|------|------|-----|
| Quality metric | 0.2  | 0.5   | 0.55 | 0.7  | 0.73 | 0.76 | 0.8  | 0.81 | 0.9 |
| MOS            | 28.3 | 34.01 | 34.6 | 68.9 | 69.1 | 69.9 | 70.5 | 72   | 79  |



Coefficient de corrélation



# Évaluation des approches objectives

## Coefficient de corrélation

- Il existe la corrélation r de **pearson**, la corrélation tau de **Kendall** et le coefficient de corrélation rho de **Spearman**.
- Le coefficient de corrélation de rang de **Spearman** :

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d^2}{n(n^2 - 1)}$$

| Quality metric | 0.2  | 0.5   | 0.55 | 0.7  | 0.73 | 0.76 | 0.8  | 0.81 | 0.9 |
|----------------|------|-------|------|------|------|------|------|------|-----|
| MOS            | 28.3 | 34.01 | 34.6 | 68.9 | 69.1 | 69.9 | 70.5 | 72   | 79  |

# Évaluation des approches objectives

## Coefficient de corrélation

◆ Le coefficient de corrélation de rang de Spearman :

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d^2}{n(n^2 - 1)}$$

$$r_s = 0.4833$$

| QM   | Rang | MOS   | Rang | $d^2$ |
|------|------|-------|------|-------|
| 0.2  | 1    | 28.3  | 1    | 0     |
| 0.55 | 3    | 72    | 8    | 25    |
| 0.73 | 5    | 34.01 | 2    | 9     |
| 0.8  | 7    | 69.9  | 6    | 1     |
| 0.81 | 8    | 68.9  | 4    | 16    |
| 0.5  | 2    | 34.6  | 3    | 1     |
| 0.76 | 6    | 69.1  | 5    | 1     |
| 0.7  | 4    | 70.5  | 7    | 9     |
| 0.9  | 9    | 79    | 9    | 0     |

# Évaluation des approches objectives

## Coefficient de corrélation

- ◆ Le coefficient de corrélation de rang de **pearson** : une mesure d'une liaison linéaire

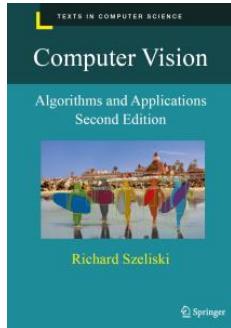
$$r_{xy} = \frac{cov(x, y)}{\sqrt{var(x)var(y)}}$$

$$cov(x, y) = \frac{1}{n} ((x_1 - \bar{x})(y_1 - \bar{y}) + \dots + (x_n - \bar{x})(y_n - \bar{y}))$$

$$var(x) = \frac{1}{n} ((x_1 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2)$$

| Quality metric | 0.2  | 0.5   | 0.55 | 0.7  | 0.73 | 0.76 | 0.8  | 0.81 | 0.9 |
|----------------|------|-------|------|------|------|------|------|------|-----|
| MOS            | 28.3 | 34.01 | 34.6 | 68.9 | 69.1 | 69.9 | 70.5 | 72   | 79  |

# Références



Computer Vision: Algorithms and Applications, 2nd ed.  
[Richard Szeliski](#)



Image Analysis and Mathematical Morphology  
[Jean Serra](#)

- ◆ Papert, Seymour A., *The Summer Vision Project*, MIT Libraries, 1966.
- ◆ Adelson and Pentland's, "The perception of shading and reflectance. Perception as Bayesian inference", In D. Knill and W. Richards (eds.), *Perception as Bayesian Inference* (pp. 409-423). New York: Cambridge University Press (1996). 1996<sup>159</sup>

# Références

- ◆ Fei Fei Li, [How we teach computers to understand pictures](#),  
Youtube, 2015.
- ◆ Equipe VC, [Voir avec ses yeux...ou le cerveau ?](#), Youtube, 2018.
- ◆ Inserm, [Au coeur des organes : L'œil et la vision](#), Youtube,  
2016.