Contact : mehdi.darouich@cea.fr

Unité flexible de calcul de disparité pour applications d'aide à la conduite

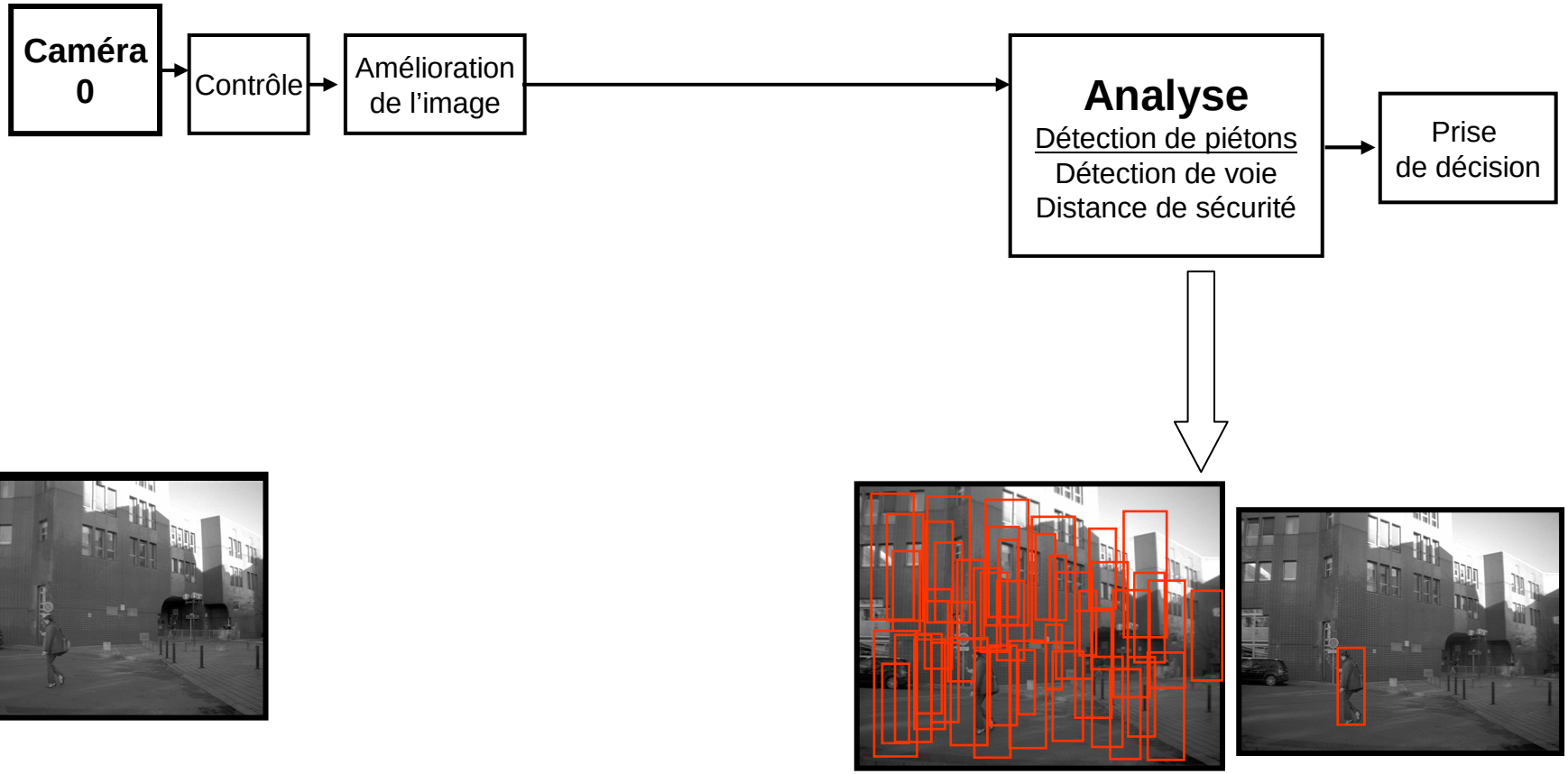
Mehdi Darouich[1], Stéphane Guyetant[1], Dominique Lavenier[2]

[1] CEA LIST, Laboratoire Calculs Embarqués
[2] ENS Cachan Bretagne / IRISA

SYMPA'13, Toulouse, France
du 09 au 11 Septembre 2009

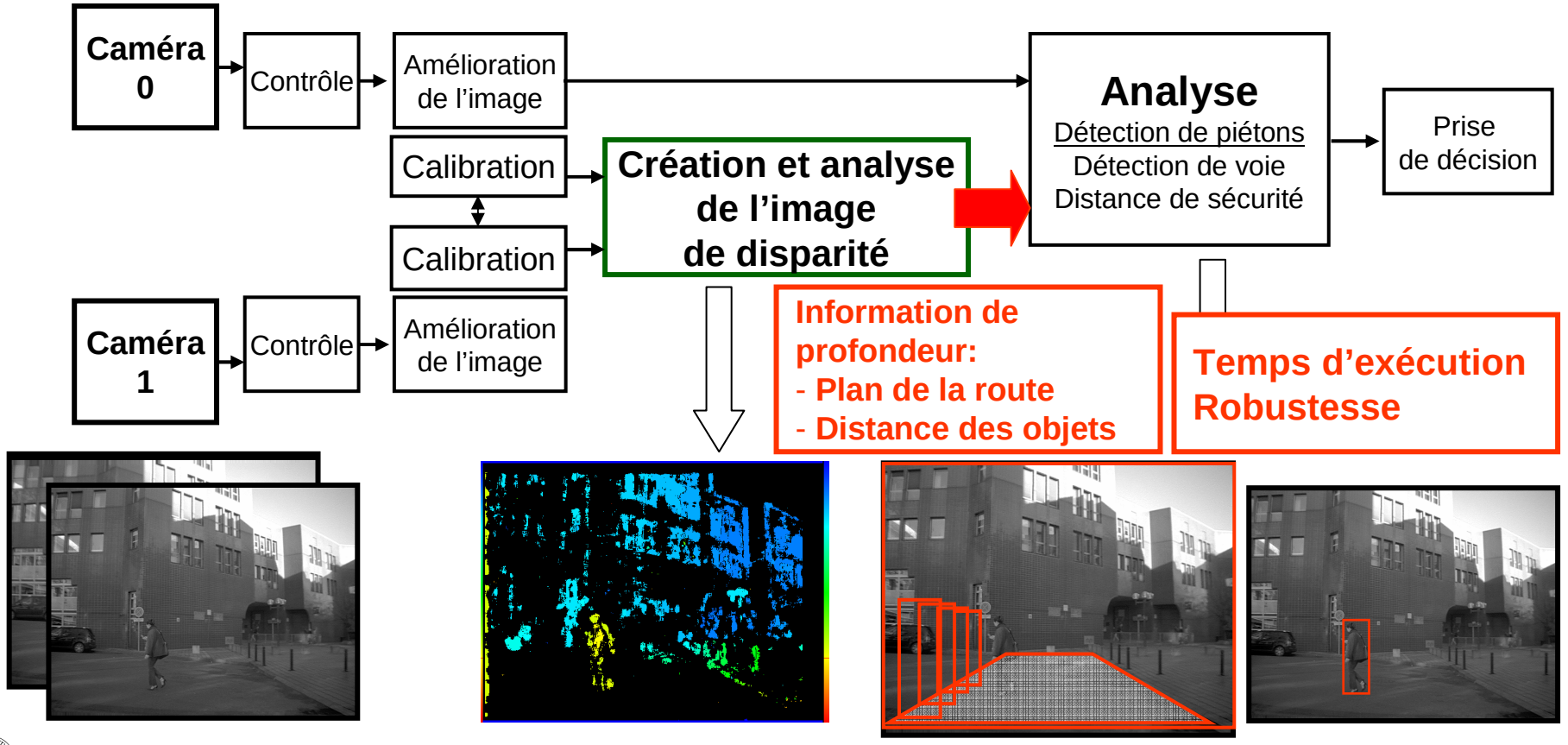
Aide à la conduite et stéréovision embarquée

- **Applications d'aide à la conduite (ADAS)**
  - ✓ Localisation du véhicule par rapport à l'environnement (route, voies)
  - ✓ Détection / localisation / identification des obstacles (véhicules, piétons, panneaux de signalisation)



Aide à la conduite et stéréovision embarquée

- **Applications d'aide à la conduite (ADAS)**
  - ✓ Localisation du véhicule par rapport à l'environnement (route, voies)
  - ✓ Détection / localisation / identification des obstacles (véhicules, piétons, panneaux de signalisation)



Création de la carte de disparité

- **Contexte temps-réel**
  - ✓ Images VGA (300 Kpix) à 40 images par seconde
- **Traitement qui nécessite une quantité importante de ressources**
  - ✓ Jusqu'à 700 GOPS pour certains traitements
    - **Exemple : SAD sur fenêtre pondérée 15x15**

- **Etape de génération des scores d'appariement**
  - ✓ Première étape de la création de la carte de disparité
  - ✓ Etape la plus couteuse en ressources
  - ✓ Degré de parallélisme élevé
  - ✓ Diverses méthodes de génération

- **Architecture flexible de génération de scores proposée:**
  - ✓ Exploitation du parallélisme et de la localité des données
  - ✓ Respect des contraintes embarquée et temps-réel
  - ✓ Flexibilité sur les méthodes de génération

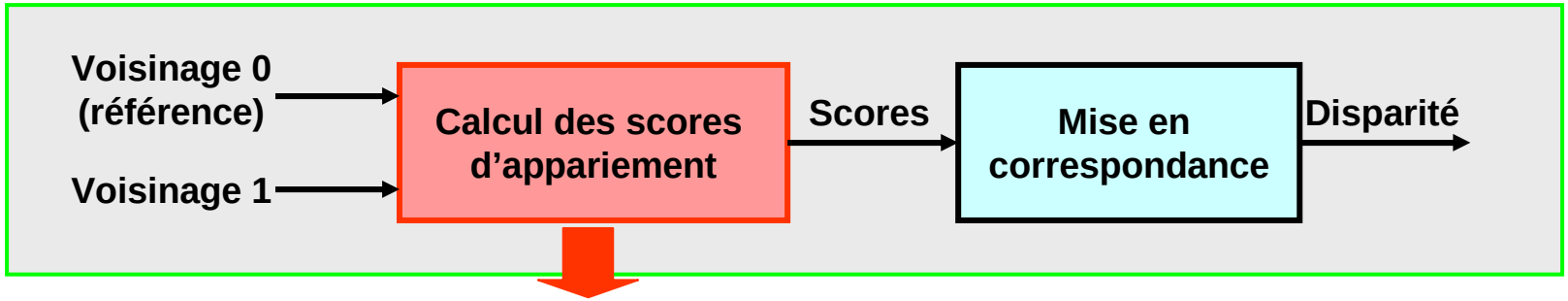
Plan de la présentation

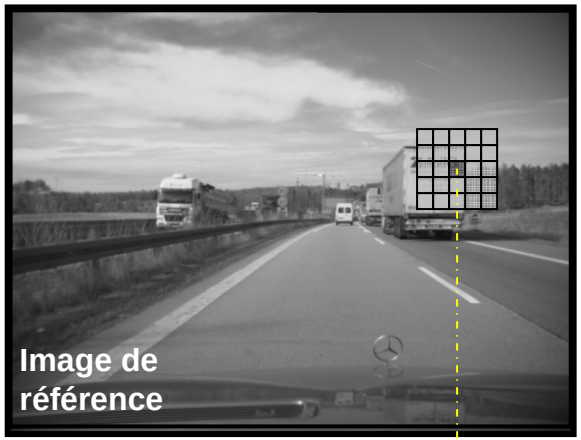
- **Création de la carte de disparité**
  - ✓ Calcul des scores d'appariement
    - Parallélisme et localité de données
    - Métriques
    - Voisinages
    - Améliorations
  - ✓ Solutions matérielles existantes
- **Solution matérielle proposée**
  - ✓ Objectifs
  - ✓ Unité flexible de calcul de scores
    - Matrice de calcul sur voisinage
    - Arbre de Réduction Flexible
    - Résultats
- **Conclusion et perspectives**

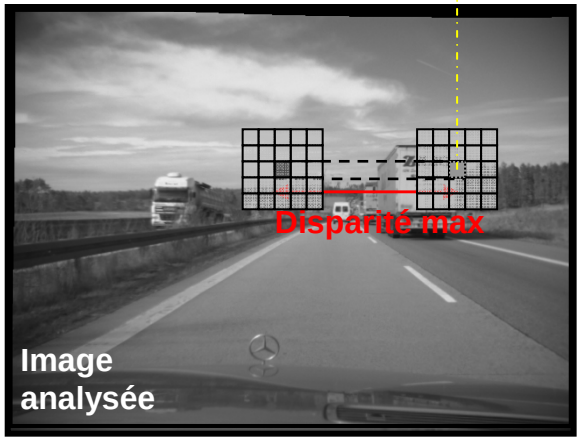
Plan de la présentation

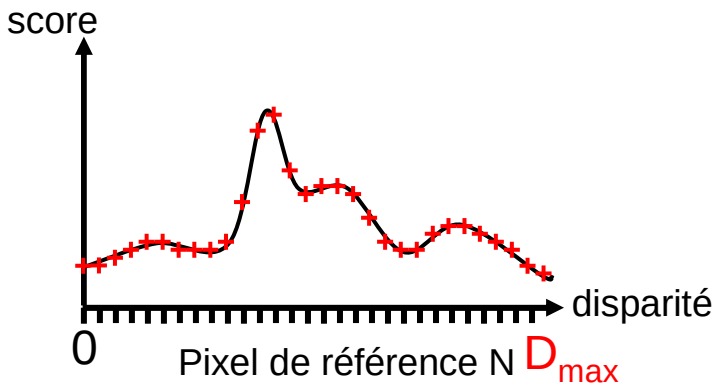
- **Création de la carte de disparité**
  - ✓ Calcul des scores d'appariement
    - Parallélisme et localité de données
    - Métriques
    - Voisinages
    - Améliorations
  - ✓ Solutions matérielles existantes
- **Solution matérielle proposée**
  - ✓ Objectifs
  - ✓ Unité flexible de calcul de scores
    - Matrice de calcul sur voisinage
    - Arbre de Réduction Flexible
    - Résultats
- **Conclusion et perspectives**

Création de la carte de disparité (1/2)



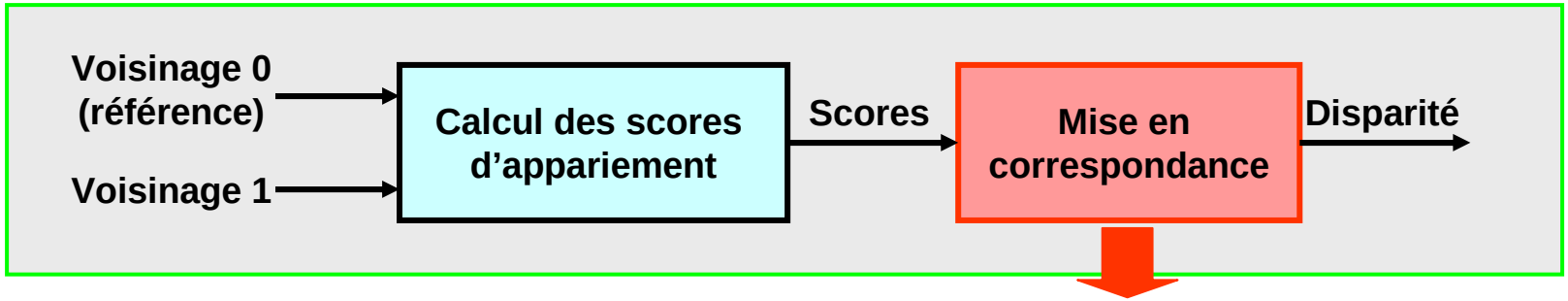


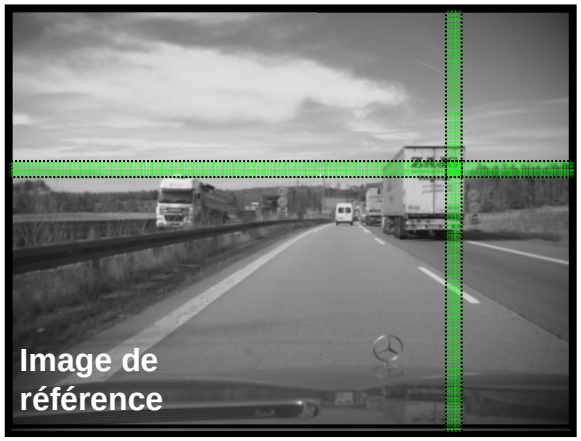


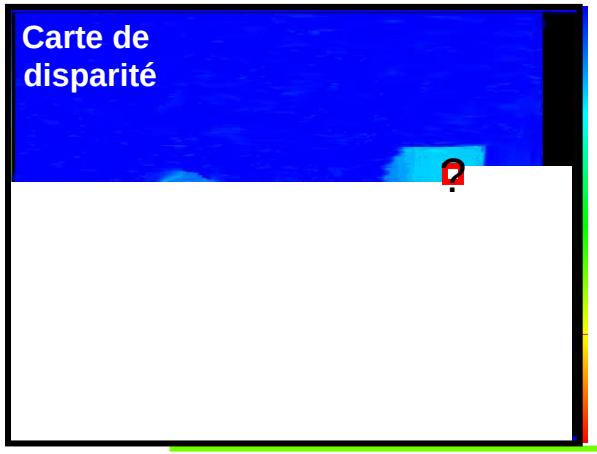


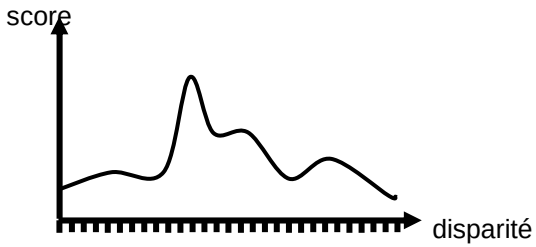
Calcul de D_{max} scores d'appariement pour chaque pixel de l'image de référence

Création de la carte de disparité (2/2)

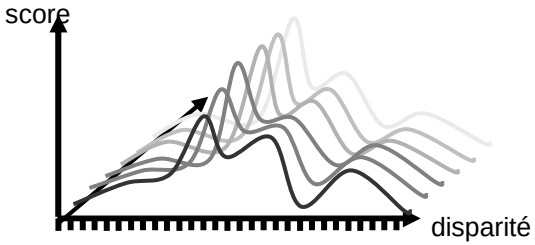








Méthodes locales

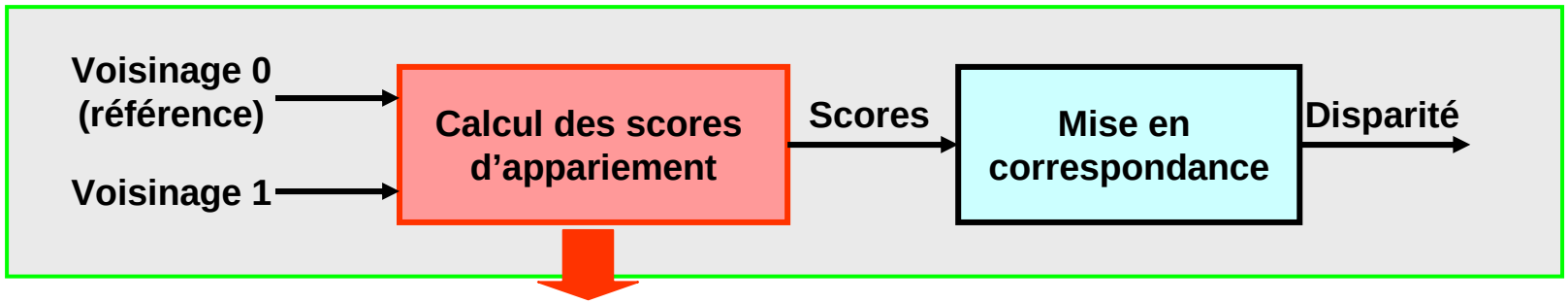


Méthodes semi-globales

Méthodes globales

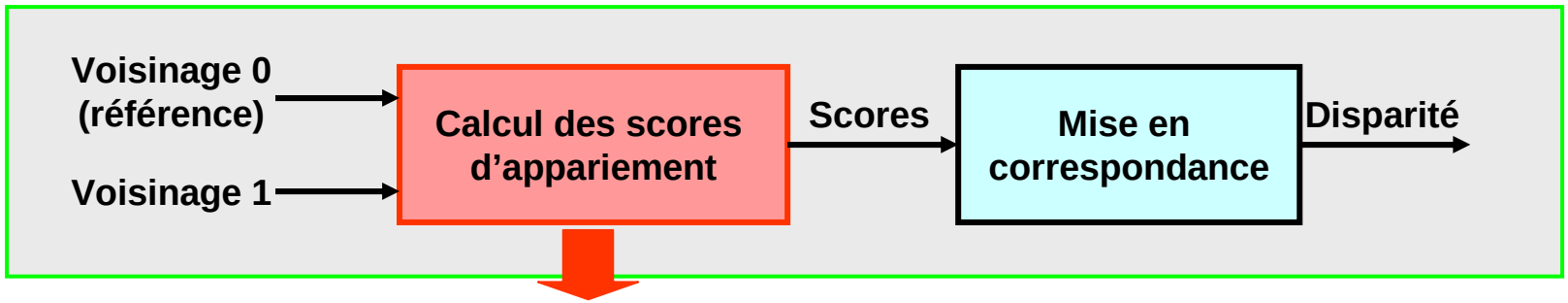
Mise en correspondance permettant de déterminer la meilleur disparité pour le pixel de référence traité

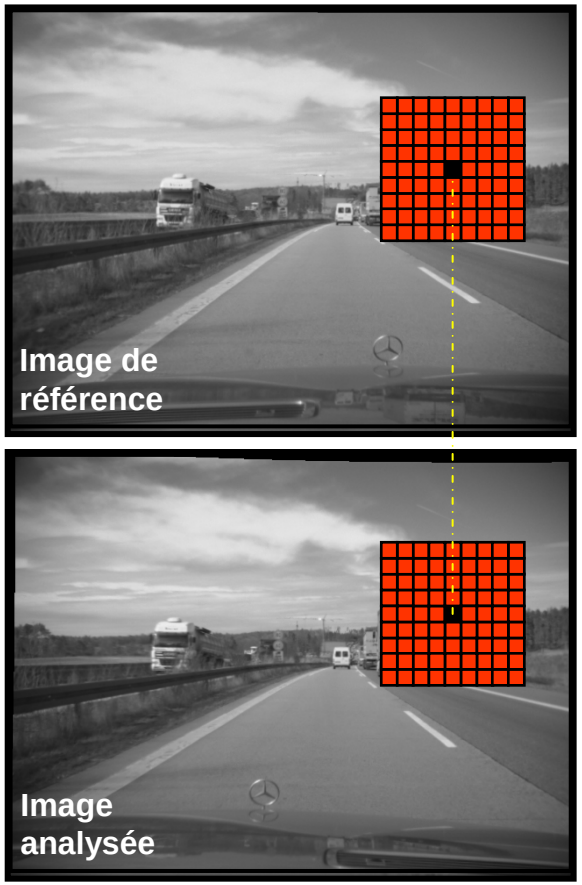
Calcul des scores d'appariement



- **Nous nous intéressons plus particulièrement à l'étape de calcul de score**
  - ✓ Très calculatoire
  - ✓ Régulière
  - ✓ Parallélisme élevé
- **Méthodes de calcul très diverses**
  - ✓ Métriques de calcul
  - ✓ Taille et forme des fenêtres de voisinage
- **<u>Contraintes embarqué et temps-réel</u>**

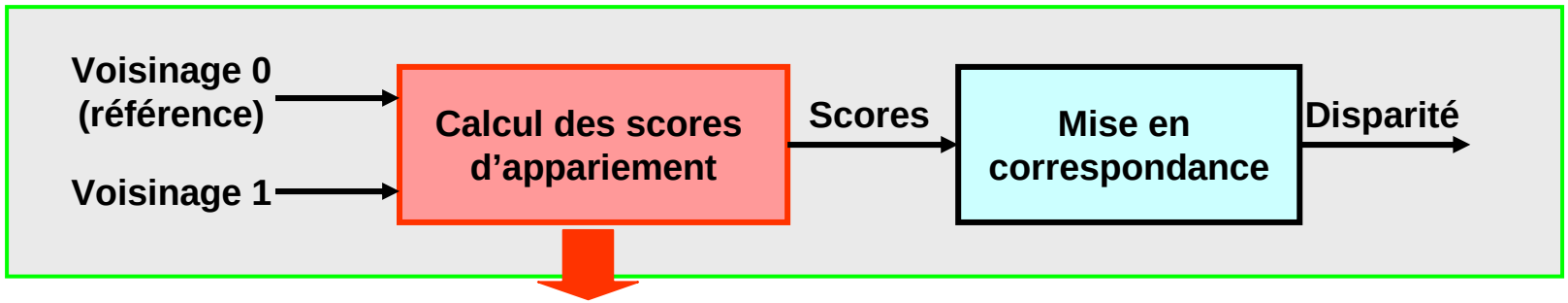
Parallélisme et localité des données

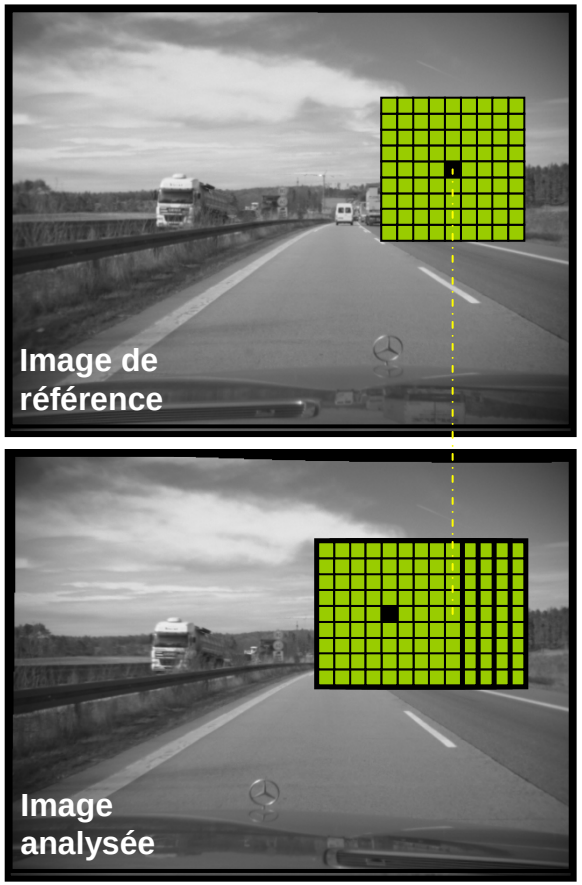




- **Parallélisme:**
  - ✓ Opérations sur les pixels d'un voisinage

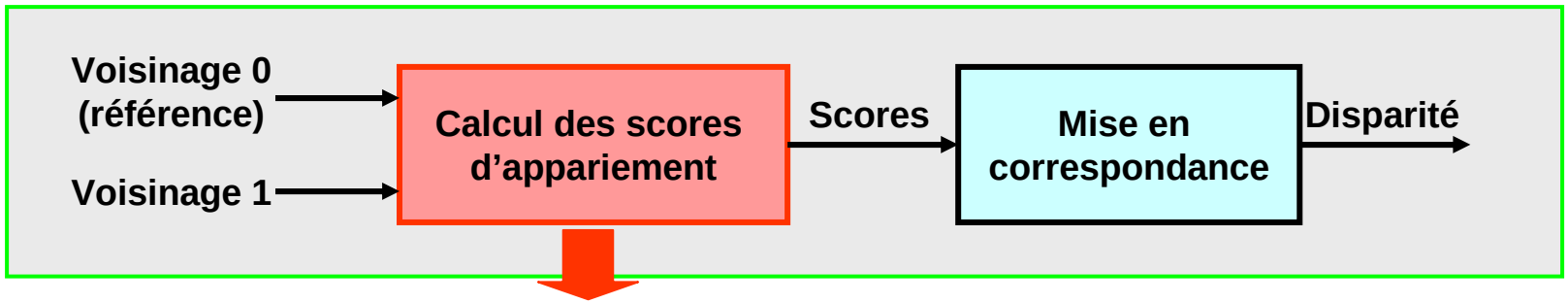
Parallélisme et localité des données

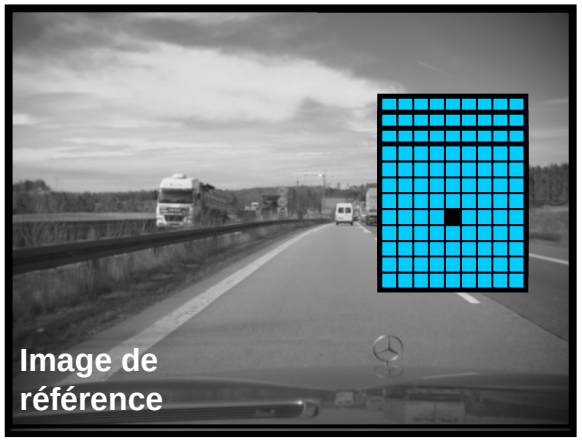


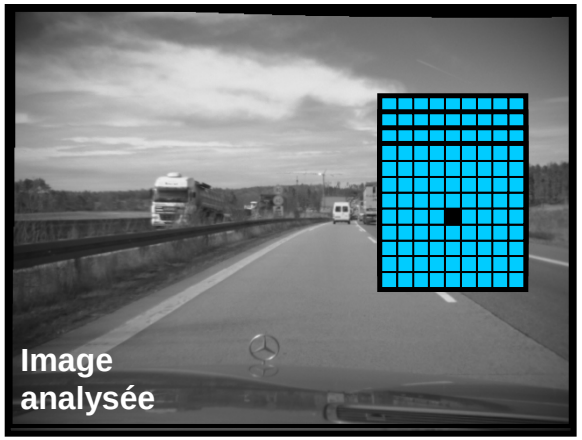


- **Parallélisme:**
  - ✓ Opérations sur les pixels d'un voisinage
  - ✓ Calcul des scores pour un pixel de référence

Parallélisme et localité des données

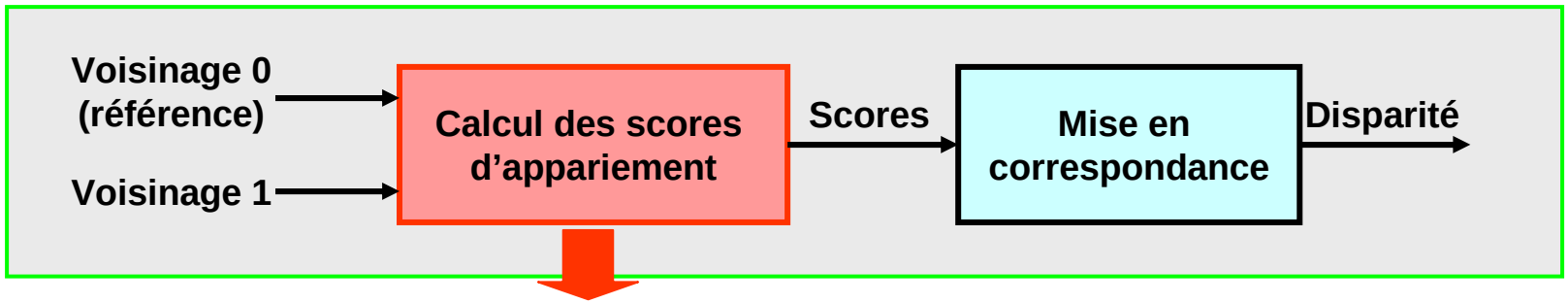


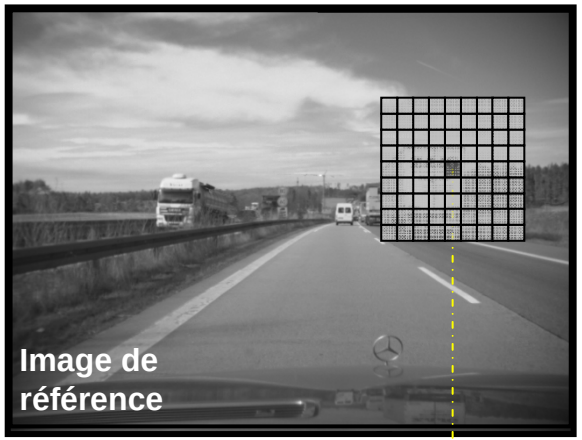


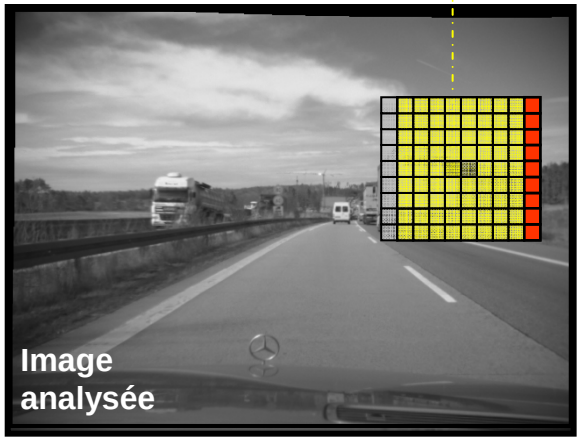


- **Parallélisme:**
  - ✓ Opérations sur les pixels d'un voisinage
  - ✓ Calcul des scores pour un pixel de référence
  - ✓ Calcul de la disparité pour plusieurs pixels de référence

Parallélisme et localité des données







- **Parallélisme:**
  - ✓ Opérations sur les pixels d'un voisinage
  - ✓ Calcul des scores pour un pixel de référence
  - ✓ Calcul de la disparité pour plusieurs pixels de référence
- **Localité des données:**
  - ✓ Voisinages de deux pixels consécutifs diffèrent d'une colonne ou d'une ligne de pixels

Calcul des scores d'appariement
Métriques

➢ **Plusieurs métriques de base**

Métrique		G/B	
SAD	$C(x,y,d)=\sum_{i,j}\lvert I_1(x+i,y+j)-I_2(x+d+i,y+j)\rvert$	-	
SSD	$C(x,y,d)=\sum_{i,j}\left(I_1(x+i,y+j)-I_2(x+d+i,y+j)\right)^2$	-	**- Carré**
NCC	$C(x,y,d)=\frac{\sum_{i,j}(I_1(x+i,y+j)\times I_2(x+d+i,y+j))}{\sqrt{\sum_{i,j}I_1(x+i,y+j)^2\times\sum_{i,j}I_2(x+d+i,y+j)^2}}$	G	**- Multiplication** **- Carré** **- Division** **- Racine carré**
CENSUS	$C(x,y,d)=\sum_{i,j}\left((I_1(x+i,y+j)>I_{c1})\mathrm{xor}(I_2(x+d+i,y+j)>I_{c2})\right)$	GB	

G/B : Insensibilité à la différence de gain (G) et de biais (B)

➢ **Versions centrées sur la moyenne du voisinage**

- ✓ ZSAD, ZSSD, ZNCC
- ✓ Elimination de la sensibilité à la différence de biais (B)

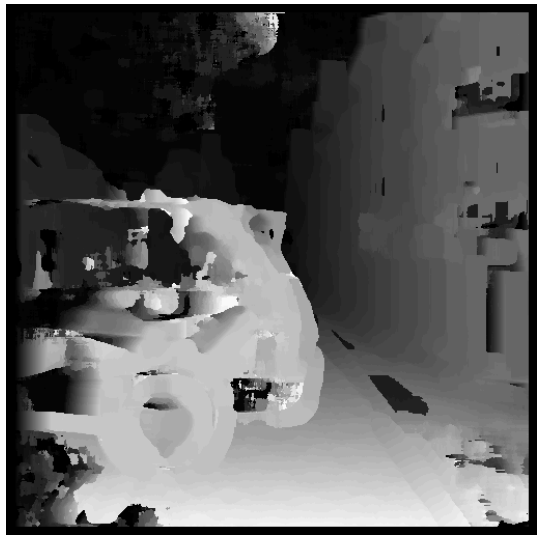
Calcul des scores d'appariement
Taille et forme de la fenêtre de voisinage:

- **Influence sur le besoin en ressources et en mémoire**
- **Petit voisinage:**
  - ✓ Convient aux zones de contour
  - ✓ Peu d'informations, sensibilité accrue au bruit

- **Grand voisinage:**
  - ✓ Convient aux zones avec peu de textures
  - ✓ Perte de précision sur les détails (contours, petits objets)

Image de référence

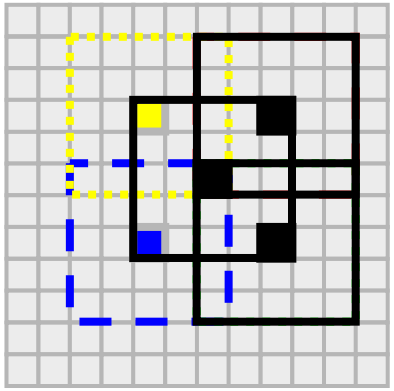
SAD 5x5



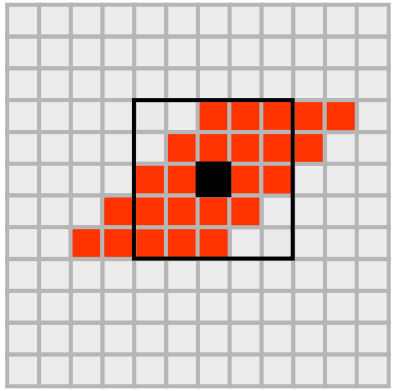
SAD 17x17

Calcul des scores d'appariement
Améliorations

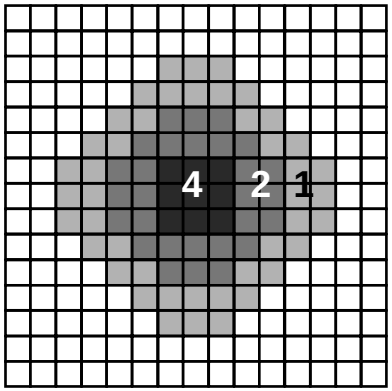
- **Calcul d'un score avec fenêtres multiples [1]**



- **Combinaison de fenêtres de taille et forme différentes [2]**



- **Fenêtres pondérées [3]**
- **Filtrage**
  - ✓ Rank, LoG …



Solutions matérielles existantes

	Métrique	Résolution (freq. image)	Dmax	Voisinage	Performances	Plateforme (fréquence)
Deepsea II (TYZX)	CENSUS	512x480 200 fps	52	-	2,6 GPDS	ASIC
Naoulou [5]	CENSUS	640x480 140 fps	64	3x3 à 7x7	2,6 GPDS	FPGA
VoC [6]	SAD	-	-	5x5 et 7x7	1,4 GPDS	FPGA (158 Mhz)
Han [7]	SAD	320x240 140 fps	64	11x11	0,7 GPDS	ASIC (120 MHz)
DO30 [2] (CEA List)	ZSSD	640x480 25 fps	256	7x7 droite 7x7 inclinée	2 GPDS	FPGA (100 MHz)

Plan de la présentation

- **Création de la carte de disparité**
  - ✓ Calcul des scores d'appariement
    - Parallélisme et localité de données
    - Métriques
    - Voisinages
    - Améliorations
  - ✓ Solutions matérielles existantes

- **Solution matérielle proposée**
  - ✓ Objectifs
  - ✓ Unité flexible de calcul de scores
    - Matrice de calcul sur voisinage
    - Arbre de Réduction Flexible
    - Résultats

- **Conclusion et perspectives**

Objectifs (1/2)

- **Contraintes liées au contexte :**
  - ✓ Paire d'images VGA (640x480)
  - ✓ 64 niveaux de disparité
  - ✓ Fréquence image de 40 fps (application pré-crash)

- **Performances nécessaires :**
  - ✓ 786 millions de scores d'appariement par seconde (0,8 GPDS)
  - ✓ Jusqu'à 700 Gops pour certaines techniques

- **Niveau de flexibilité visé**
  - ✓ Plusieurs métriques de calcul de score d'appariement
    - **SAD, ZSAD, CENSUS**
  - ✓ Taille et forme de fenêtres de voisinage
    - **Taille maximale : 15x15**
    - **Formes diverses (ex : rectangle, inclinée)**
    - **Fenêtres multiples avec ou sans recouvrement**
    - **Fenêtres pondérées**

Objectifs (2/2)

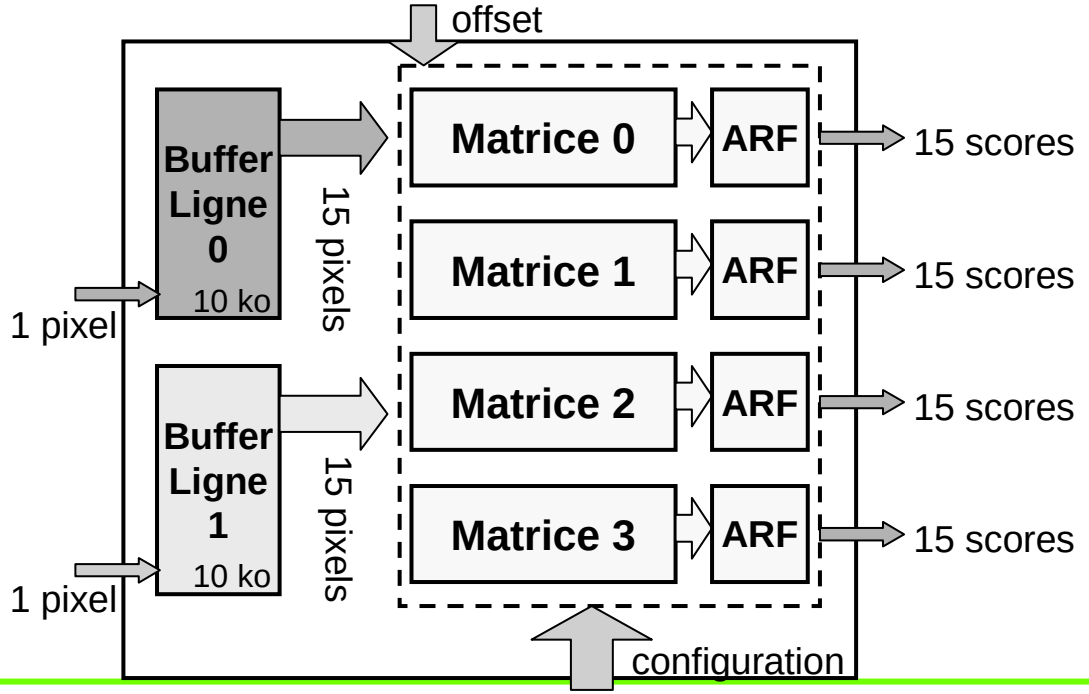
- **786 millions de scores d'appariement par seconde**
- **Fréquence de fonctionnement : 200 MHz**
  - ✓ Respect de la contrainte embarqué
    - **Limitation en surface**
    - **Faible consommation**

- **Implique le calcul de 4 scores d'appariement par cycle**
  - ✓ Pour une fenêtre 15x15:
    - **900 couples de pixels à traiter à chaque cycle**
  - ✓ Cas d'une SAD:
    - **3 opérations à effectuer pour chaque couple de pixels**
    - **Différence, valeur absolue, somme**

- **Structure matricielle flexible**
  - ✓ Elément de calcul flexible pour adapter la métrique
  - ✓ Arbre de réduction flexible pour adapter la taille et la forme des fenêtres de voisinage

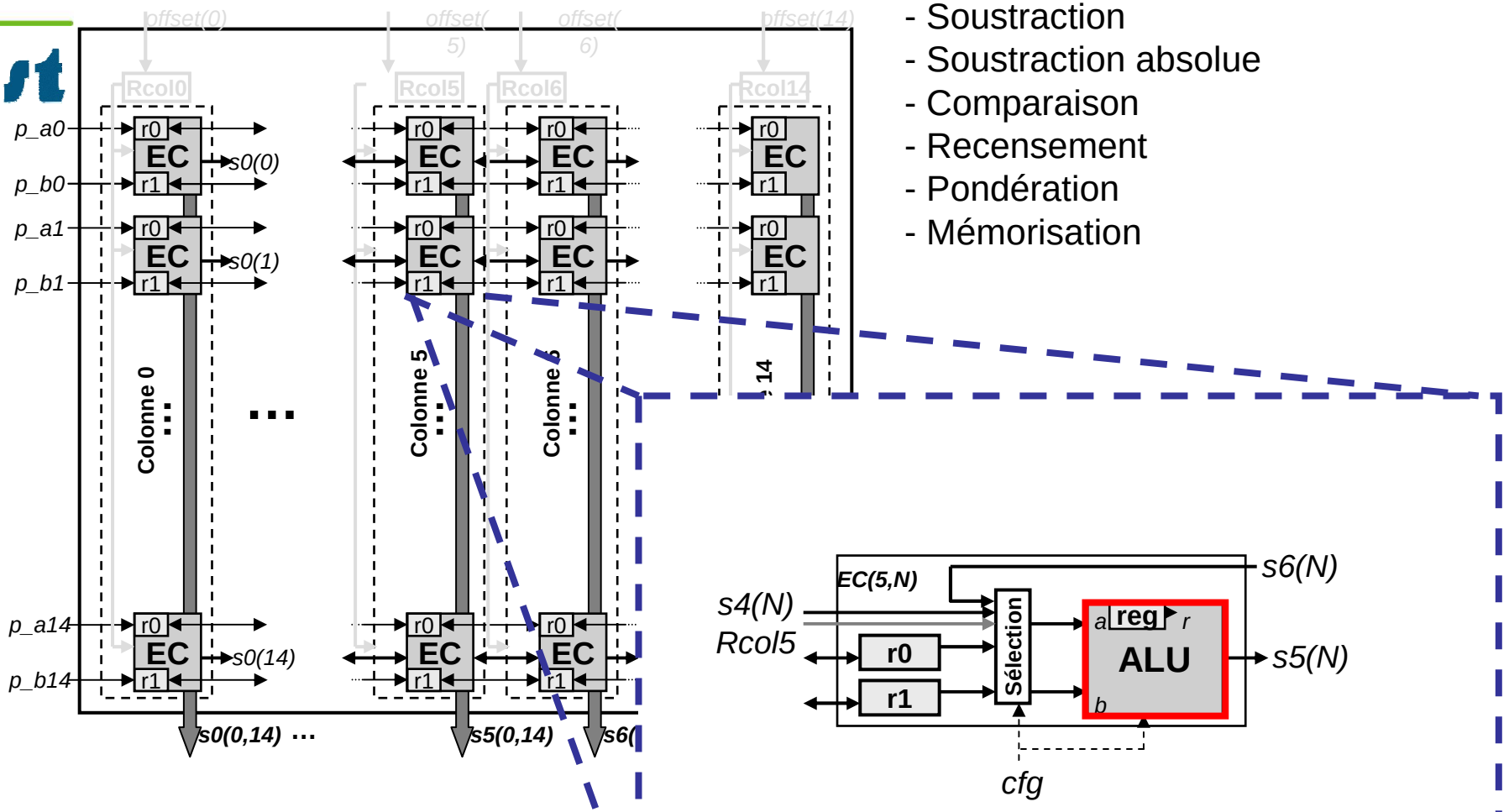
Unité flexible de calcul de scores

- **4 matrices de 225 éléments de calcul reconfigurables**
  - ✓ 15 colonnes de 15 éléments chacune
- **2 buffers de lignes de 10 ko chacun**
  - ✓ Stockage de 16 lignes d'image VGA par buffer
- **Arbre de réduction flexible (ARF) à la sortie de chaque matrice**
  - ✓ Sommation des sous-scores générés au sein de la matrice
  - ✓ Génère jusqu'à 15 scores par cycles

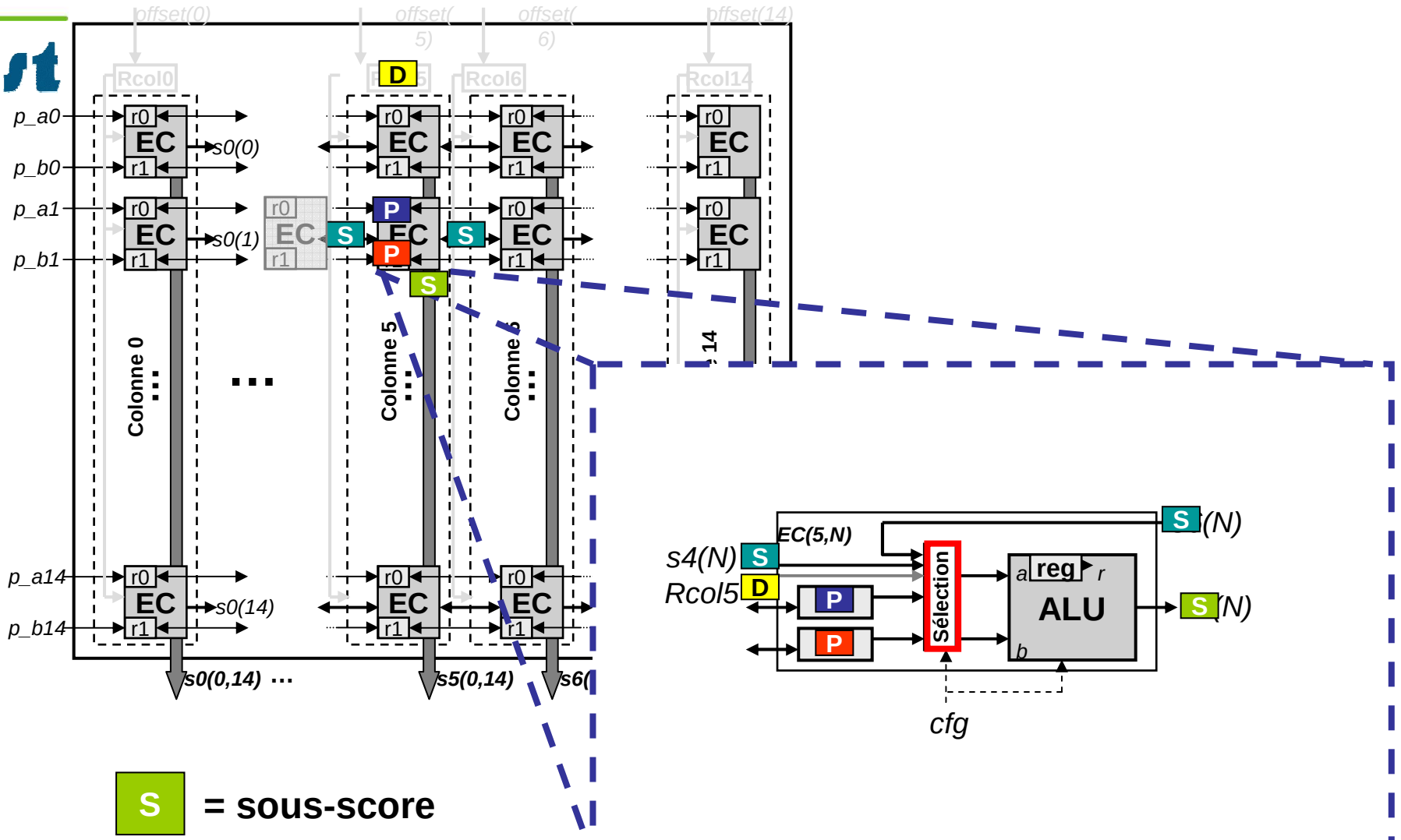


Matrice de calcul sur voisinage : Description

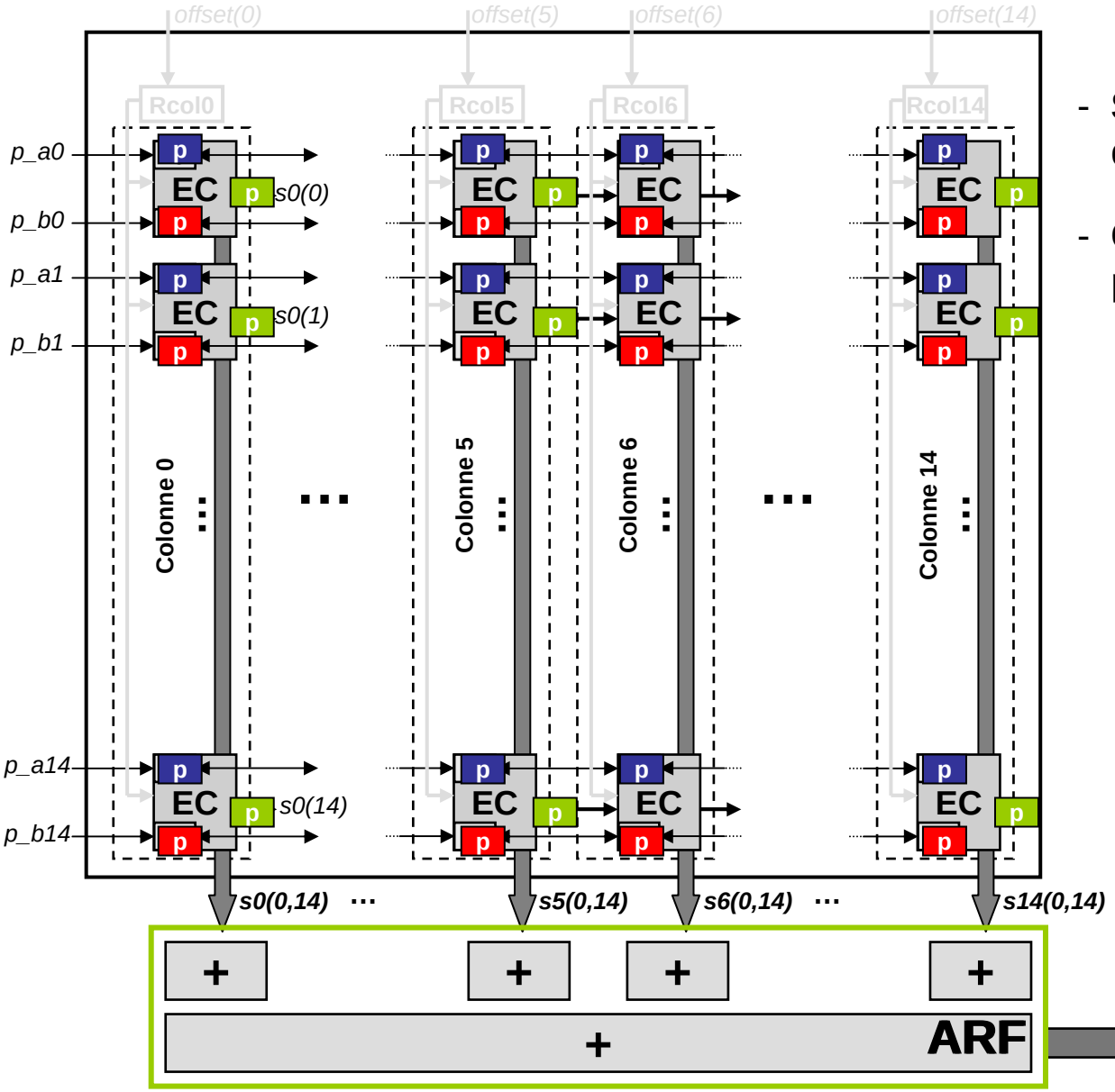
Opérations effectuées par l'ALU:
- Soustraction
- Soustraction absolue
- Comparaison
- Recensement
- Pondération
- Mémorisation



Matrice de calcul sur voisinage : Description

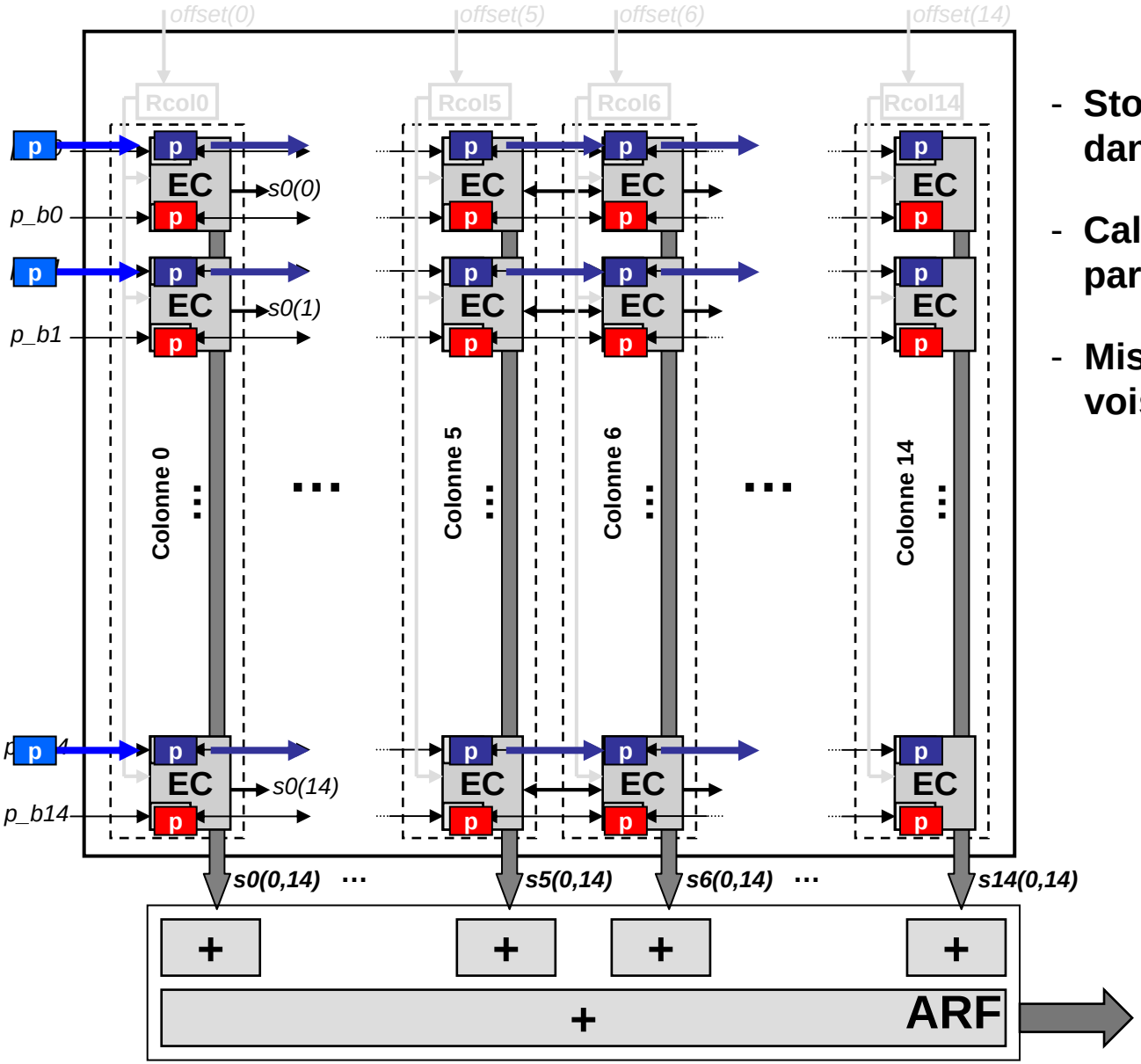


Matrice de calcul sur voisinage : Localité des données



- **Stockage des pixels dans la matrice**
- **Calcul d'un score par cycle**

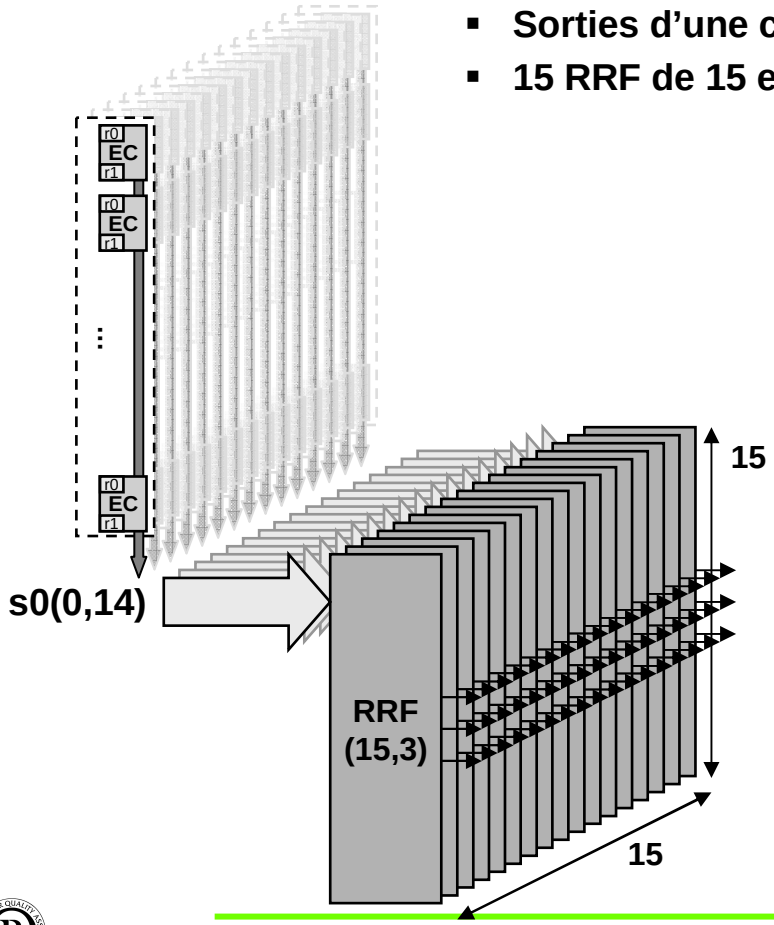
Matrice de calcul sur voisinage : Localité des données

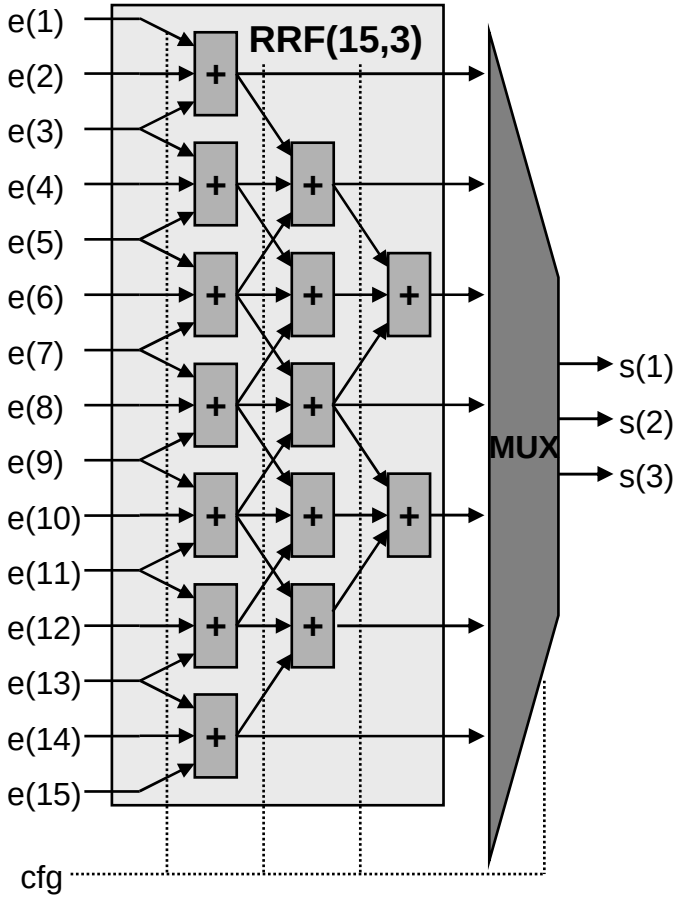


- **Stockage des pixels dans la matrice**
- **Calcul d'un score par cycle**
- **Mise à jour des voisinages**

Arbre de Réduction Flexible

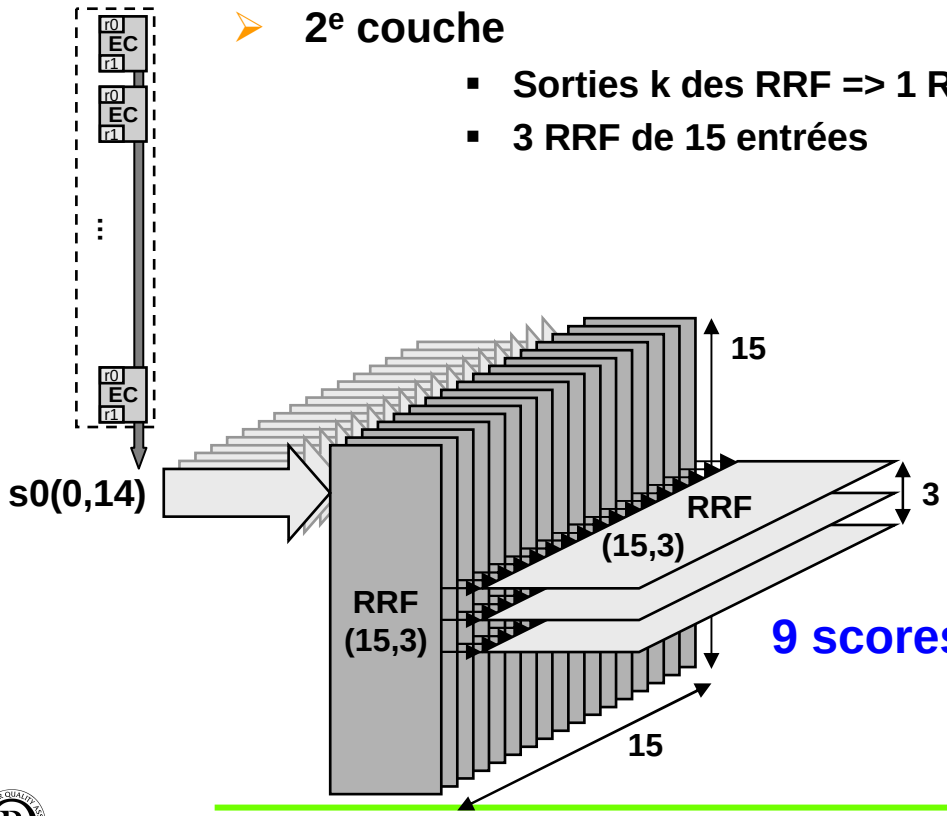
- **Arbre de réduction flexible (9 scores)**
  - ✓ Composé de réseaux de réduction flexible (RRF)
- **1e couche :**
  - **Sorties d'une colonne => 1 RRF**
  - **15 RRF de 15 entrées**



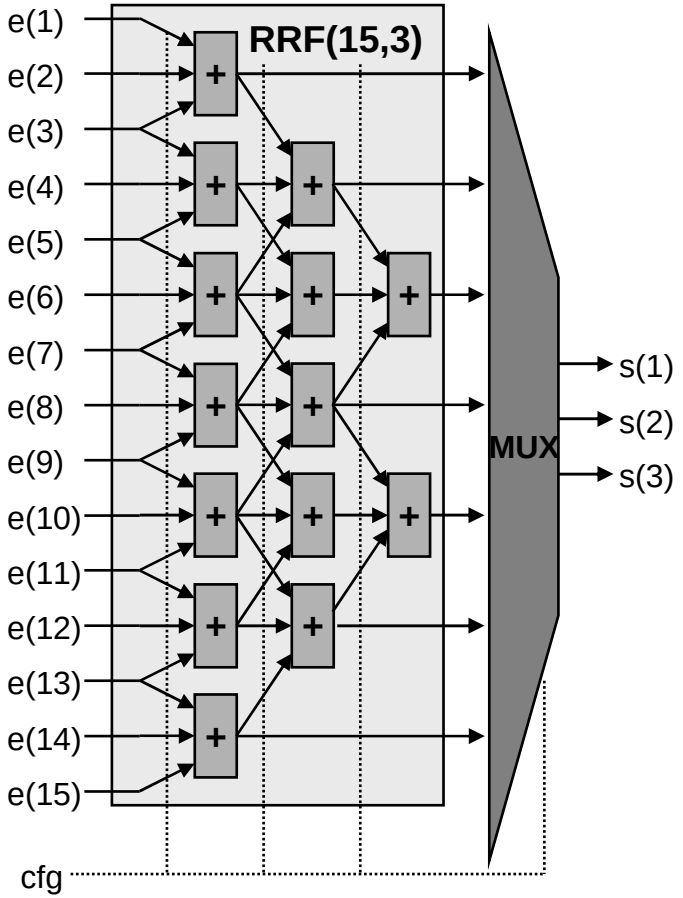


Arbre de Réduction Flexible

- **Arbre de réduction flexible (9 scores)**
  - ✓ Composé de réseaux de réduction flexible (RRF)
- **1e couche :**
  - **Sorties d'une colonne => 1 RRF**
  - **15 RRF de 15 entrées**
- **2e couche**
  - **Sorties k des RRF => 1 RRF**
  - **3 RRF de 15 entrées**

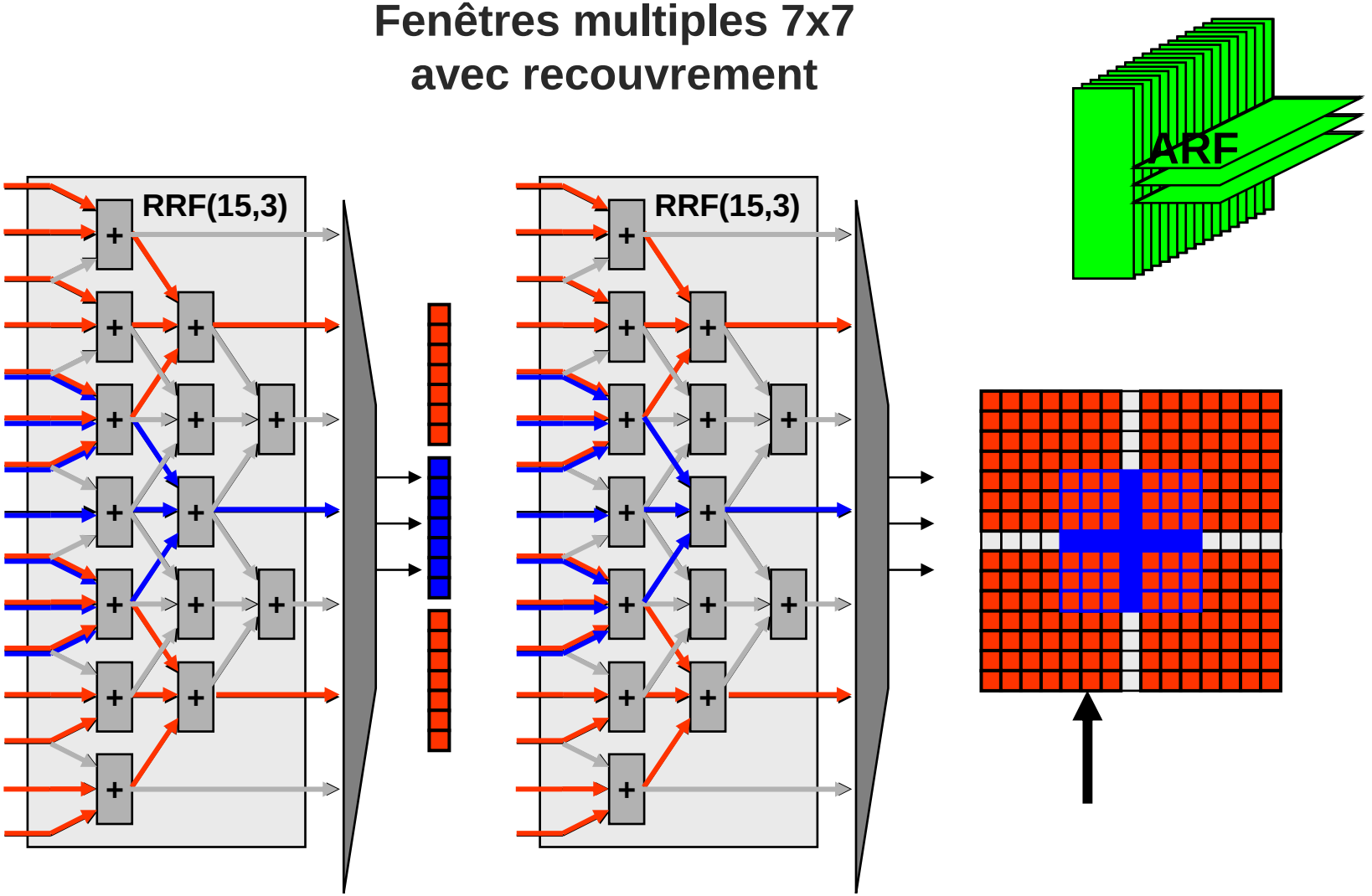


9 scores / cycle

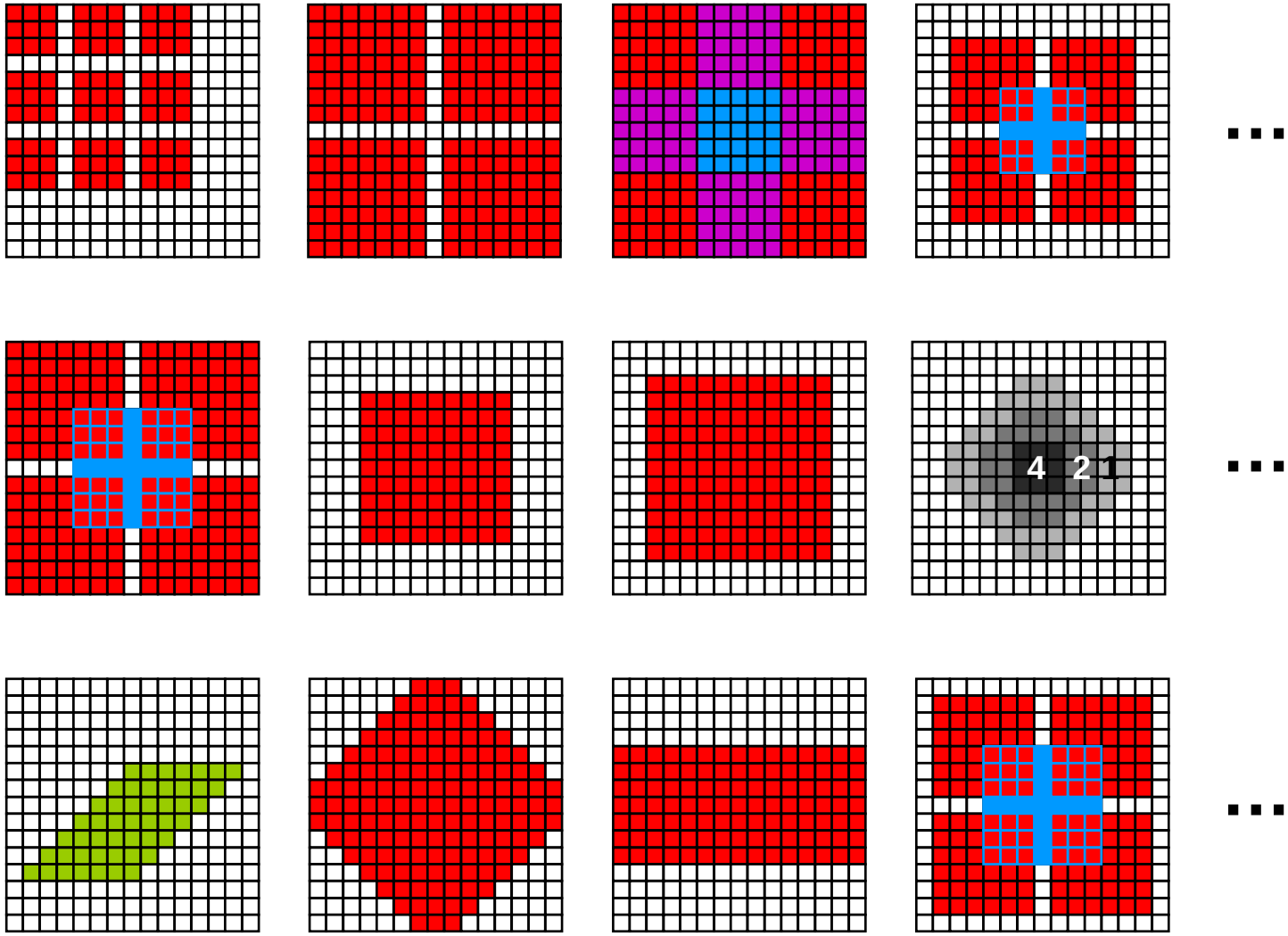


ARF : Exemple de configuration

Fenêtres multiples 7x7
avec recouvrement



ARF : Quelques exemple de configuration



Résultats

- **Performances envisagées:**
  - ✓ Paire d'images VGA (640x480)
  - ✓ 64 niveaux de disparité
  - ✓ Fréquence image de 40 fps (application pré-crash)
- **Soit :**
  - ✓ 786 millions de scores d'appariement par seconde (0,8 GPDS)

- **Niveau de flexibilité atteint**
  - ✓ Plusieurs métriques de calcul de score d'appariement
  - ✓ Taille et forme de fenêtres de voisinage flexibles

- **Synthèse ASIC en technologie 65nm Low-Power à 200 MHz**
  - ✓ Version de l'unité de calcul de score flexible sans l'opération de pondération
  - ✓ Arbre de réduction simplifié
  - ✓ Surface d'environ 3 mm^2

Plan de la présentation

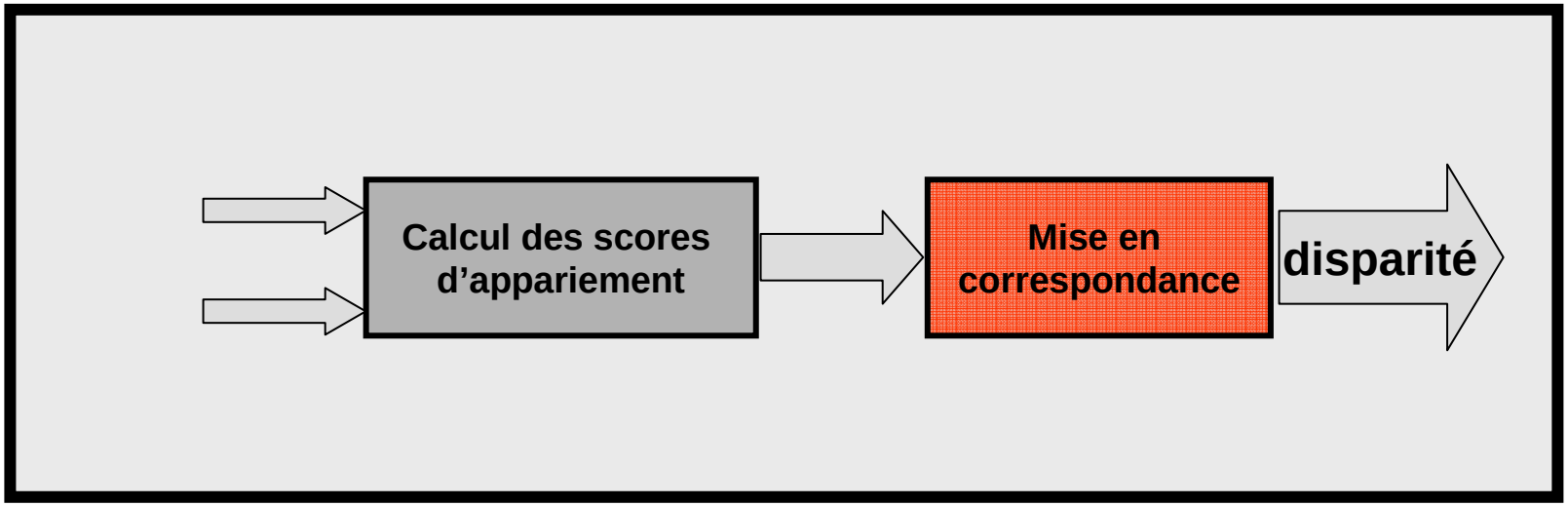
- **Création de la carte de disparité**
  - ✓ Calcul des scores d'appariement
    - Parallélisme et localité de données
    - Métriques
    - Voisinages
    - Améliorations
  - ✓ Solutions matérielles existantes
- **Solution matérielle proposée**
  - ✓ Objectifs
  - ✓ Unité flexible de calcul de scores
    - Matrice de calcul sur voisinage
    - Arbre de Réduction Flexible
    - Résultats
- **Conclusion et perspectives**

Conclusion

- **Système permettant le calcul de scores d'appariement**
  - ✓ Respect des contraintes temps-réel du domaine applicatif (ADAS)
  - ✓ Respect des contraintes embarquées
    - **Environ 3 mm² de surface en 65nm LP**
  - ✓ Flexibilité sur plusieurs aspects
    - **Métriques de calcul**
    - **Taille et forme des fenêtres**

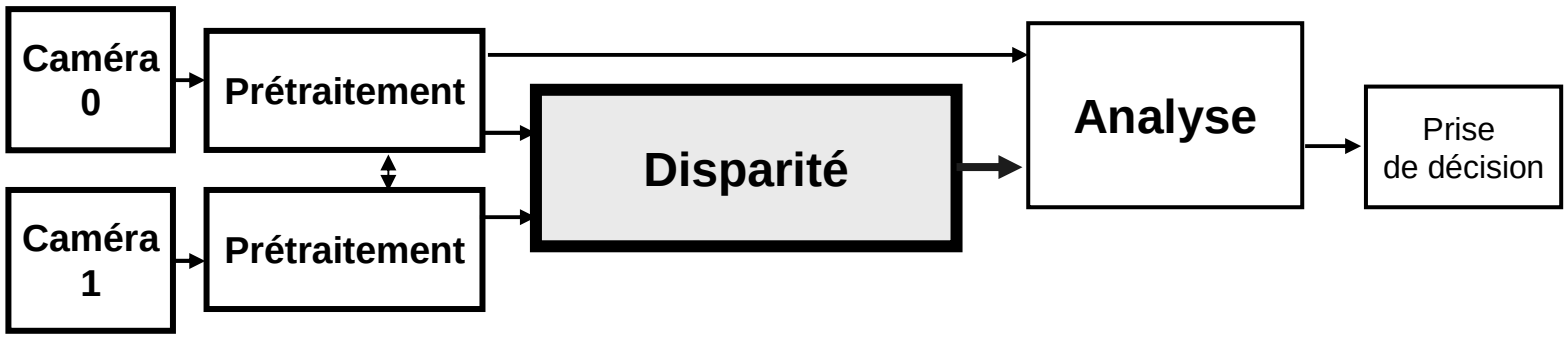
Perspectives

- **Perspectives:**
  - ✓ Intégrer une unité de traitement de ces scores d'appariement
    - **Mise en correspondance selon différentes méthodes**



Perspectives

- **Perspectives:**
  - ✓ Intégrer une unité de traitement de ces scores d'appariement
    - **Mise en correspondance selon différentes méthodes**
  - ✓ Intégrer ce système au sein d'un SoC pour l'aide à la conduite
    - **Apport des bénéfices de la stéréovision à une chaîne d'application d'aide à la conduite**
  - ✓ Utilisation de l'unité flexible de calcul de score pour d'autres traitements
    - **Filtrages (ex: Rank, Sobel)**



MERCI POUR VOTRE ATTENTION

QUESTION ?

Contact : mehdi.darouich@cea.fr

Références

[1] Hirschmüller, H.; Innocent, P. R. & Garibaldi, J. Real-Time Correlation-Based Stereo Vision with Reduced Border Errors Int. J. Comput. Vision, Kluwer Academic Publishers, 2002, 47, 229-246

[2] Ventroux N.; Schmit R.; Pasquet F.; Viel P.-E. & Guyetant S. Stereovision-based 3D obstacle detection for automotive safety driving assistance, 12th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (2009)

[3] Yoon, K. & Kweon, I. S. Adaptive support-weight approach for correspondence search Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, April 2006, 28, 650-656

[4] Ramin Zabih and John Woodfill. Non-parametric local transforms for computing visual correspondence. In ECCV '94 : Proc. of the Third European Conf.-Volume II on Computer Vision, pages 151–158, London, UK, 1994. Springer-Verlag

[5] A. Naoulou, J.-L. Boizard, J.Y. Fourniols, and M. Devy. An alternative to sequential architectures to improve the processing time of passive stereovision algorithms. In Field Programmable Logic and Applications, 2006. FPL '06. Int. Conf. on, pages 1–4, 2006.

[6] R.P. Jacobi, R.B. Cardoso, and G.A. Borges. Voc : a reconfigurable matrix for stereo vision processing. pages 6, April 2006

[7] Sang-Kyo Han, SeongHoon Woo, Mun-Ho Jeong, and Bum-Jae You. Improved-quality real-time stereo vision processor. pages 287–292, Jan. 2009.