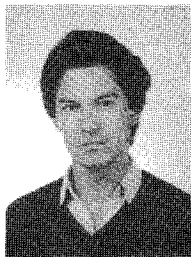


## CAICOU :

## l'Analyse d'Images Couleur

CAICOU : the Color Image Analysis

**José-Luis GORDILLO**

Laboratoire LIFIA/IMAG, 46, avenue Félix-Viallet, 38031 GRENOBLE CEDEX.

Il a fait ses études à l'Institut Technologique d'Aguascalientes du Mexique, son pays d'origine, pour obtenir son diplôme d'ingénieur en 1977. Ensuite, M. Gordillo a travaillé jusqu'en 1982 dans l'industrie et pour le gouvernement mexicain. Il est en France depuis 1982 au Laboratoire LIFIA de l'ENSIMAG à Grenoble, où il obtient son DEA en 1983. Actuellement, il continue ses travaux de recherche en vue de l'obtention du Doctorat d'Université sur le thème de « la vision en couleur pour la robotique ».

Ses recherches portent sur la représentation de la couleur à l'intérieur d'un système de vision, et sur la coopération bras/œil, en particulier sur l'insertion de routines de vision (couleur) dans un système de programmation automatique de robots.

**RÉSUMÉ**

Nous décrivons CAICOU (système Conversationnel d'Analyse d'Images COUleur), un environnement interactif facilitant l'utilisation et la mise en œuvre d'algorithmes d'analyse d'images digitalisées en couleur. Le fonctionnement de CAICOU repose sur deux processus se déroulant en parallèle : l'extraction d'indices de contraste pour la construction de lignes fermées qui forment des régions, et l'analyse de ces régions pour trouver des homogénéités. La couleur joue un rôle important dans ces deux processus; elle fournit la « meilleure » *composante couleur* pour l'extraction de contraste, et caractérise les homogénéités des régions par des *attributs de couleur*.

CAICOU a été utilisé dans le cadre de l'analyse d'images stéréoscopiques de fils électriques, et constitue la base pour le développement d'un système de synthèse de programmes de vision à partir de descriptions d'assemblages.

**MOTS CLÉS**

Vision par Ordinateur, reconnaissance de couleurs, extraction d'attributs, extraction de caractéristiques.

**SUMMARY**

The CAICOU (Conversational Analysis of Color Images) system is an interactive environment that simplifies the use and the implementation of algorithms for color image analysis. Processing is performed in two simultaneous steps : the extraction of contrast features to build closed regions, and the analysis of these regions to detect homogeneous features. Color information is important for both steps; providing the "best" color component to the operator of contrast extraction, and characterizing region homogeneities by their color features.

CAICOU has been successfully applied to the identification of electrical wires in stereo color images, and actually supports the system development for the synthesis of vision programs from assembly descriptions.

**KEY WORDS**

Computer Vision, color recognition, color analysis, feature extraction.

**1. Introduction**

Le développement du matériel électronique (i.e. convertisseurs couleur, opérateurs cablés d'extraction d'indices d'image...) permet l'exploitation de plus en plus sophistiquée du signal fourni par un capteur caméra. Il permet notamment l'utilisation de la

couleur qui est nécessaire à la solution de nombreux problèmes pour lesquels les images en noir et blanc fournissent une information insuffisante, même si le volume d'information à traiter est très important.

Jusqu'à maintenant la couleur a été utilisée principalement comme un support de segmentation. Cependant, nous considérons qu'elle doit intervenir de façon déterminante tout au long du processus d'analyse

d'une image. Dans [5] l'auteur propose une chaîne de représentations de la couleur pour un système de vision, comprenant la représentation numérique à trois dimensions fournie par le capteur, une représentation symbolique traduisant l'aspect des objets, et une série de représentations intermédiaires.

Pour la segmentation, la couleur intervient dans deux étapes de l'analyse; elle fournit la « meilleure » *composante couleur* pour alimenter les opérateurs d'extraction de contraste, et elle caractérise, de façon unique et discriminante, les homogénéités des régions par des *attributs couleur*.

Les processus de « haut niveau » (à savoir : la planification, la modélisation à partir des fonctions...) raisonnent sur des objets pour élaborer soit un plan d'action, une stratégie de conception, etc. Ces raisonnements utilisent une représentation symbolique pour décrire les objets, les propriétés importantes des objets, et les faits pouvant modifier l'état de l'univers. La couleur, grâce à son haut contenu descriptif et discriminatif, constitue une des propriétés des objets des plus caractéristiques et est adaptée à ce type de raisonnement. La description de la couleur utilisée à cette étape d'analyse a une nature symbolique, fondée sur des modèles de la perception humaine, et correspond à la *nomenclature des couleurs*.

Les niveaux intermédiaires de description couleur servent de liaison entre la description numérique attachée à l'image et la description symbolique attachée aux objets. La couleur intervient aussi pour aider les processus se déroulant à ces niveaux; elle facilite la mise en correspondance entre Indices Visuels (IVs) provenant de plusieurs images (dans le cas de la stéréovision ou de l'analyse de mouvement), ou entre les IVs de l'image et les indices construits à partir des modèles d'objets (dans le cas de l'identification d'objets ou de la vérification visuelle).

Dans le présent article, nous étudions l'analyse de « bas niveau » d'images couleur, à travers les représentations de la couleur qui participent à cette analyse. Notre proposition est concrétisée par le système CAICOU qui est un environnement logiciel pour l'analyse d'images digitalisées en couleur.

L'analyse effectuée par CAICOU consiste en l'extraction des entités descriptives de l'image. Issu du système CAIMAN [9], il conserve la base algorithmique et la philosophie de ce système, mais il a été enrichi par l'apport de la couleur, ce qui se traduit par la construction d'IVs spécifiques.

Deux classes d'Indices Visuels sont construites par le système : les *Indices de Contraste*, qui reflètent les changements abrupts d'intensité délimitant les régions dans l'image, et les *Indices de Couleur* décrivant les homogénéités à l'intérieur de ces régions. L'extraction d'IVs est réalisée au moyen de deux processus qui se déroulent en parallèle; d'abord, les Indices de Contraste sont extraits pour construire des lignes fermées, puis des opérateurs d'analyse de régions sont appliqués à l'intérieur, pour vérifier leur homogénéité et les qualifier avec des attributs de couleur. Le parallélisme logique est implanté par des algorithmes incrémentaux (coroutines) permettant un contrôle optimal des opérations.

Une application importante, qui a permis de valider les concepts mis en œuvre dans CAICOU, a été l'identification et la localisation de fils électriques de différentes couleurs, dans le cadre d'un projet d'automatisation complète de la fabrication de connecteurs électriques. Pour ce projet, il était nécessaire d'utiliser un système de vision stéréoscopique en couleur. Nous utiliserons cette application pour illustrer les développements tout au long de cet article.

Le rapport [6] est une version détaillée du présent article. Dans ce rapport, nous mettons l'accent sur l'aspect « système » de CAICOU, avec l'énumération des algorithmes utilisés, entre autres, pour l'application de l'assemblage des fils. Dans la présente version, nous sommes intéressés par le traitement et l'utilisation de l'information couleur qui supporte l'analyse d'images. La section 2 est consacrée aux principes de base d'une telle analyse, la formation d'images couleur et l'extraction d'IVs Contraste et Couleur. Les représentations de la couleur utilisées dans l'extraction de ces IVs sont présentées dans la section 3. La section 4 traite de la transformation de l'information couleur vers la représentation symbolique qui est à l'origine d'une *palette de couleurs*. Nous exposons une méthode de différenciation entre les couleurs *chromatiques* et *achromatiques*. L'assemblage des fils électriques, application qui a servi comme exemple pour la validation de notre approche, sera présentée dans la section 5.

## 2. Analyse d'images couleur

L'interprétation d'une image passe par l'élaboration de structures de données intermédiaires, structures considérées comme des représentations de l'image et de la scène à différents niveaux d'abstraction [3]. De manière générale nous classifions CAICOU comme un système de vision de « bas niveau », car il agit en interaction directe avec l'image et la structure résultante est liée au *même* repère bi-dimensionnel.

Dans CAICOU on distingue de façon hiérarchique les niveaux énoncés dans la figure 1. La partie droite du tableau décrit les opérateurs fonctionnant dans les niveaux respectifs, inscrits en partie gauche.

Niveau de structure	Opérateurs	
	Contraste	Couleur
Niveau image:	Modification, par prise de vue, du contenu des mémoires d'image et inspection des valeurs des pixels (sans utiliser aucune transformation).	
Points:	Calcul du gradient et détermination de points de contraste.	Calcul, pour les points, des paramètres couleur.
Suites:	Enchaînement de points pour la création de lignes de contraste ("simples" et "doubles").	Détermination des valeurs couleur pour une suite de points, calcul de la dispersion statistique sur ces valeurs.
Caractéristiques de suites:	Création d'entités représentatives des lignes de contraste trouvées.	Caractérisation des entités homogènes par leur valeur de couleur.

Fig. 1. — Niveaux de représentation dans CAICOU.

Notre stratégie d'analyse cherche à éviter l'exploration complète de l'image en repérant seulement les IVs nécessaires. Il s'agit d'une analyse « guidée par le but ». A cet effet, l'extraction d'IVs dans CAICOU est dirigée et incrémentale : d'abord, les Indices de Contraste délimitent les régions dans l'image, ensuite, les Indices Couleur s'appliquent à l'intérieur de ces régions afin de vérifier leur homogénéité et de les qualifier avec des paramètres couleur.

Dans les paragraphes suivants, nous faisons un rappel sur les principes de la formation des images couleur, car c'est à partir du tableau image que les Indices de Contraste et les Indices Couleur sont extraits pour constituer les niveaux de représentation supérieurs. Ensuite, nous présentons brièvement les opérateurs d'extraction des Indices de Contraste et Couleur. Cette section se termine avec l'exposé du fonctionnement de CAICOU.

## 2.1. FORMATION D'UNE IMAGE COULEUR

Au niveau image nous trouvons l'information brute d'entrée, composée, comme dans le cas d'une image noir et blanc, d'un tableau de pixels. Néanmoins, au lieu des pixels à une valeur qui composent les images *achromes*, les pixels couleur sont des vecteurs à trois composantes qui traduisent l'intensité lumineuse pour les trois couleurs de base (RVB – rouge, vert et bleu).

Les trois grandeurs des couleurs primaires définissent un espace tridimensionnel, appelé le modèle RVB, qui constitue la représentation numérique de base de la couleur. Dans cet espace, une couleur particulière est décrite par ses coordonnées sur les axes RVB, coordonnées que l'on nomme les *valeurs tristimuli* de cette couleur.

Par convention, la gamme des couleurs perceptibles est représentée dans le sous-espace de valeurs tristimuli positives et normées. L'espace orthonormé ainsi formé, connu sous l'appellation de *solide des couleurs*, apparaît dans la figure 2. Aux sommets du cube unité se trouvent les couleurs primaires (rouge, vert et bleu), et les couleurs complémentaires (jaune, magenta et cyan). Le sommet placé à l'origine (0, 0, 0) et son opposé (1, 1, 1) correspondent respectivement au noir et au blanc. Ces deux extrémités du solide sont unis par le vecteur à composantes égales  $[R = V = B]$ , ou *axe achromatique*. Les *plans chromatiques*, perpendi-

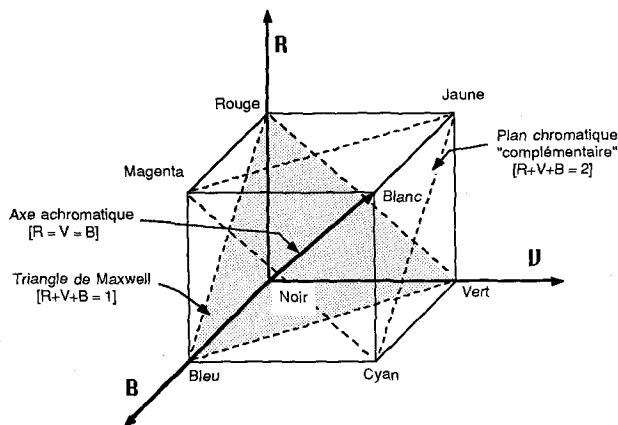


Fig. 2. – Solide des couleurs RVB.

culaires à l'axe achromatique, se définissent selon la relation  $[R + V + B = Cte]$ ; ils portent la gamme chromatique de couleurs à luminance égale. Le triangle de Maxwell est le plan chromatique constitué par les sommets rouge, vert et bleu  $[R + V + B = 1]$ .

A partir de cette description de base, diverses transformations sont applicables pour rendre explicites des caractéristiques importantes de l'information couleur [7], comme par exemple les concepts liés à la perception humaine des couleurs : la teinte, la luminance et la saturation, ou la projection du plan chromatique dans le repère cartésien qui est à l'origine du système CIE, etc.

Les opérateurs travaillant au niveau image sont simples : la lecture et l'écriture de la mémoire d'image et la prise de vue qui permettent l'inspection des valeurs tristimuli des pixels et le remplacement de l'image.

## 2.2. INDICES DE CONTRASTE

L'étape initiale d'analyse consiste en l'extraction des Indices de Contraste. La construction de ces indices a une double vocation : constituer une description compacte de l'image et délimiter les régions en vue de la création d'entités descriptives plus riches. Les Indices de Contraste, reflétant les changements abrupts d'intensité, sont construits à partir du gradient de l'image. Une discussion détaillée sur l'extraction des Indices de Contraste considérés par le système se trouve dans [10]. Nous nous intéressons à trois types d'indices :

*Point de contraste*, défini par une valeur maximale de gradient sur une coupe transversale du profil de contraste.

*Ligne de contraste*, définie comme une séquence de points de contraste. CAICOU comporte deux opérateurs de suivi, fondés tous les deux sur le même principe. Le suivi de lignes simples rend comme résultat une chaîne de points constituant une ligne de contraste. Le suivi de lignes doubles, effectué par application simultanée des opérateurs de suivi en deux emplacements spécifiques de l'image, rend deux chaînes de points constituant deux lignes de contraste « parallèles<sup>(1)</sup> » sur l'image.

*Segment de droite*, correspondant à l'approximation analytique d'une ligne par une droite. L'opérateur de recherche des droites, travaillant de manière incrémentale, prend en entrée : le pixel sur la ligne de contraste fourni à chaque pas du suivi simple, ou bien, le point milieu des deux lignes dans le cas du suivi double. Il correspond à l'algorithme de découpage itératif avec recalage, présenté et discuté en détail dans [10].

L'intérêt du suivi double réside dans le fait que les lignes « parallèles » constituent des indices significatifs pour plusieurs types d'image. Elles décrivent par exemple les rivières et les routes dans les images aériennes, les vaisseaux sanguins dans les images radiologiques, ou les profils des objets dans nos images de fils.

(<sup>1</sup>) Le parallélisme est défini localement par rapport à l'orientation des deux points en cours d'analyse.

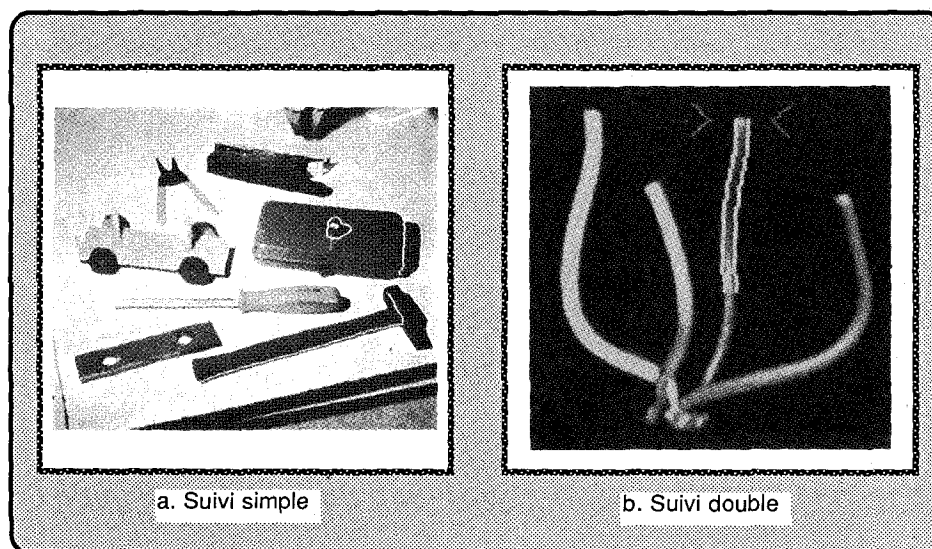


Fig. 3. — Résultats du suivi simple et double.

Les photos de la figure 3 illustrent les résultats obtenus respectivement par un suivi simple et un suivi double.

### 2.3. INDICES COULEUR

Les Indices Couleur servent à détecter et à qualifier des entités homogènes dans l'image, ils sont à l'origine de la notion de *région*. Une région est composée par un ensemble connexe de pixels lesquels satisfont un *prédicat d'homogénéité* qui énonce leurs caractéristiques non partagées par les régions voisines. Formellement, les régions définissent une partition des pixels d'une image (c'est-à-dire tout pixel doit appartenir à une seule région et il n'y a pas de pixel sans région d'appartenance).

La segmentation d'images à partir de régions constitue une approche classique largement utilisée depuis les débuts de la Vision par Ordinateur [15]. Intuitivement, les régions correspondraient aux projections des surfaces visibles des objets. Malheureusement, la pratique a montré que la formation des régions est trop sensible aux perturbations de la prise de vue (i. e. variations de l'éclairage, bruit du capteur, etc.). Les méthodes de segmentation se sont dès lors axées plutôt sur l'extraction du contraste qui offre une plus grande stabilité face à de telles perturbations.

Nous utilisons une méthode mixte de construction des Indices Couleur; d'abord les Indices de Contraste sont chaînés pour trouver des lignes fermées définissant des régions, ensuite les opérateurs de recherche d'Indices de Couleur sont appliqués à l'intérieur des régions définies, pour vérifier leur homogénéité. La construction des limites des régions est basée sur le concept de « Lignes-Brisées-Image » fermées introduit par Demazeau [3].

Les Lignes-Brisées-Image (LBI) sont obtenues par concaténation des « Triplets-Image » (notés TI) définis par un segment de droite et ses nœuds extrémités. Les LBI sont : *continues* (les éléments consécutifs des triplets LBI sont connexes), *d'intérieur topologique vide* (aucun segment de droite n'est à l'intérieur), *minimales* (LBI ne contient pas deux fois le même

triplet TI), et *maximales* (l'adjonction d'un nouveau triplet TI à la suite LBI provoque la réfutation d'au moins l'une des trois premières propriétés).

Une LBI est fermée quand ses segments initial et final sont connexes. L'ensemble des LBI's fermées définit une partition complète de l'image en terme de régions. L'exploration de l'intérieur de ces périmètres est assurée par les opérateurs d'extraction d'Indices Couleur décrits ci-dessous.

Dans le cas de l'analyse guidée par le but, l'extraction complète des LBI's s'avère inutile. La construction et l'exploration des LBI's se fait de façon incrémentale; dès la découverte d'une LBI, l'emplacement pour l'application d'opérateurs d'extraction d'Indices Couleur est défini. Les opérateurs couleur agissent aussi de façon incrémentale. Ils sont définis comme suit :

*Point de couleur*, le calcul des valeurs de couleur pour un pixel de l'image. Le calcul s'effectue sur des espaces transformés qui explicitent des propriétés de couleur pertinentes pour la classification et pour la caractérisation des pixels. Nous utilisons les concepts liés à la perception des couleurs (la Teinte, la Luminance et la Saturation) comme espace de définition des entités couleur, car ils constituent des paramètres distincts et ordonnés propres à la classification (voir : section 4), et constituent la base pour une éventuelle désignation des couleurs.

*Suite colorée*, l'enchaînement des points d'une même couleur. L'opérateur prend en entrée une « forme » particulière à suivre<sup>(2)</sup>. Pendant le parcours des points qui décrivent la forme suivie, l'opérateur approche les valeurs couleur par une couleur particulière et définit des marges de tolérance, grâce au calcul de la dispersion statistique de ces valeurs. Quand l'homogénéité n'est plus vérifiée, l'opérateur délivre la suite couleur qui vient d'être créée.

<sup>(2)</sup> Toute forme pouvant être décomposée par des suites de lignes. Ainsi par exemple, l'image entière peut se décomposer en la suite définie par le balayage. A noter l'inadéquation de cette approche pour une analyse ascendante, dans la mesure où la reconstruction d'entités couleur à partir de cette exploration de l'image est inefficace par nature.

*Entité couleur*, composée par une règle d'exploration qui traduit la forme particulière à explorer, des seuils de dispersion permis pour les valeurs couleur, et des conditions d'arrêt. Cet opérateur détermine la stratégie d'exploration des IVs couleur en construction, il rend comme résultat l'ensemble d'entités couleur *entièrement* construites pendant le parcours.

Dans le cas de notre application (l'analyse des fils électriques) le fonctionnement des opérateurs est établi par le processus de la segmentation des fils en segments polygonaux. La règle d'exploration est dictée par le profil du fil extrait par l'opérateur de suivi double. Les *points couleur* considérés correspondent aux points de milieu fournis à chaque pas du suivi. L'enchaînement de ces points produit une *suite colorée*. La condition d'arrêt est définie par le changement de direction du parcours, provoquant la terminaison d'un segment de droite, ou par le changement sensible de la couleur à l'intérieur du même segment. Le résultat de l'analyse est une suite de segments polygonaux avec des caractéristiques couleur homogènes. Nous appelons « droites de couleur » les *entités couleur* ainsi construites.

## 2.4. STRUCTURE DU SYSTÈME

La structure du système CAICOU, dans sa version actuelle, apparaît dans la figure 4. Les différents niveaux de représentation sont distingués; les flèches en trait continu véhiculent l'information entre niveaux, tandis que le contrôle algorithmique défile comme l'indiquent les flèches en trait pointillé. L'in-

formation concernant la couleur (étant aussi un flot de données) se déplace sur les flèches épaisses.

L'utilisateur (ou les fonctions d'interprétation) se charge de la définition et de l'application de l'analyse, par des requêtes qui peuvent être considérées comme un *langage assembleur* de la vision.

L'analyse consiste en l'application d'une procédure particulière de segmentation (selon la définition du type d'IVs à extraire) dans une configuration spécifique de la machine (les paramètres utilisés pour l'extraction), cette conjonction conditionne la classe d'IVs résultante.

L'incidence des appels de segmentation s'illustre par les flèches de contrôle partant de l'utilisateur dans la figure 4. Ces requêtes peuvent se faire aux différents niveaux du système; chaque niveau fait successivement des appels aux opérateurs résidant dans le niveau inférieur immédiat, jusqu'à la construction complète de l'IV motivant son appel.

Les opérateurs de segmentation ont été implantés selon un modèle *producteur-consommateur* par des coroutines incrémentales. Un IV produit par une coroutine est aussitôt présenté aux « consommateurs » déclarés pour ce type d'IV, qui peuvent produire à leur tour des IVs d'un niveau supérieur, etc. Par exemple, une coroutine de suivi de lignes consomme des points de contraste.

Jusqu'au niveau des lignes de contraste, l'activation des opérateurs se fait de façon descendante. Par contre, les opérateurs du niveau segmentation de lignes sont des coroutines appelées explicitement à ce niveau.

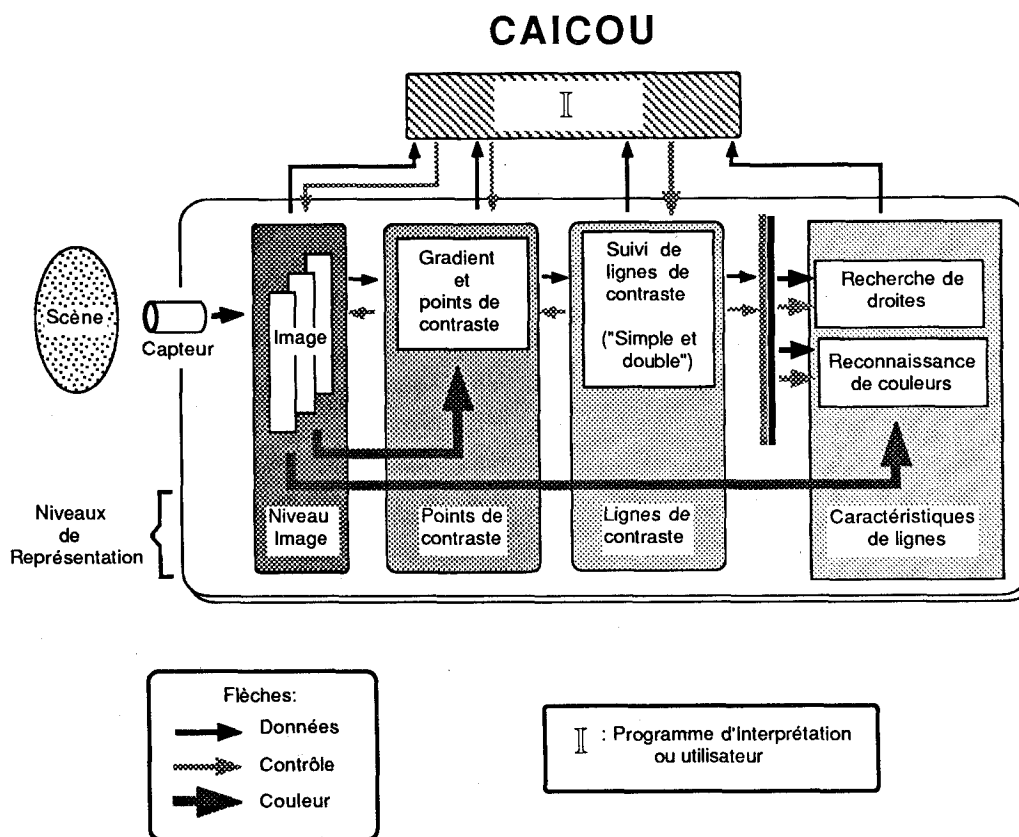


Fig. 4. — Structure de CAICOU.

Soulignons le caractère incrémental de l'analyse : par exemple, à chaque étape du suivi, les données concernant le point d'analyse sont envoyées aux consommateurs de niveau supérieur, qui sont chargés d'engendrer des entités significatives pour décrire les entités suivies. Dans notre application pour l'analyse d'images de fils, les données considérées correspondent aux coordonnées X, Y ou au vecteur tristimuli du point. Dans le cas du suivi simple, c'est le point suivi qui est envoyé aux consommateurs, tandis que pour le suivi double c'est le point milieu qui est pris en compte pour l'analyse.

### 3. Traitements spécifiques liés à la couleur

Dans le cadre de la vision de bas niveau, deux problèmes majeurs se posent concernant l'information couleur : en premier lieu, quelle combinaison des primaires RVB fournit le meilleur support de segmentation? Ensuite, comment caractériser les objets par leurs indices de couleur, en vue de leur éventuelle désignation? Ces deux questions s'adressent respectivement à la segmentation des images couleur et à la reconnaissance des couleurs (la deuxième question n'étant pas seulement du ressort du bas niveau).

Pour la segmentation d'images, l'opérateur gradient classique s'applique sur un domaine unidimensionnel (les valeurs de gris), qui est stable et complètement défini dans son intervalle. Dans le cas de l'utilisation de cet opérateur sur des images couleur, l'effort de segmentation est multiplié par le nombre de composantes images à utiliser. Il s'avère que l'information portée par les trois plans couleur est fortement corrélée, et de ce fait redondante. De plus, un effort supplémentaire est requis pour superposer d'une façon cohérente le contraste trouvé séparément sur les différents plans.

L'utilisation d'une transformation de l'espace de couleur est proposée comme alternative. En particulier, la transformation de Karhunen-Løve produit une représentation couleur dont les composantes sont bien définies et ordonnées par rapport à l'utilité pour la segmentation [8], [12], [13]. L'opérateur d'extraction de contraste est alors alimenté avec la composante qui porte l'information la plus significative dans le

nouveau repère. Malheureusement le coût de calcul de cette transformation est excessif pour pouvoir l'intégrer à un système de vision. Ohta [13] propose un espace sous-optimal basé sur l'évaluation expérimentale de l'utilisation de la transformation de Karhunen-Løve. Pour la segmentation de fils colorés, nous utilisons le mécanisme de multiplexage des composantes RVB que nous présentons dans le paragraphe 3.1.

Pour la reconnaissance et la nomenclature des couleurs, nous avons choisi un modèle de Munsell réduit [7], basé sur une représentation TLS (teinte, luminance et saturation). Nous verrons dans le paragraphe 3.1 et dans la section 4 la base d'un tel calcul. Il s'agit d'assigner des valeurs de couleur, discriminantes et bien distinctes, aux régions délimitées par les lignes de contraste. Pour chaque région, ces valeurs seront traduites par le nom de la couleur qui désigne son apparence. Le choix de nom s'effectue selon une « palette » prédéfinie qui correspond au dictionnaire des couleurs connues du système.

La création de la palette correspond au découpage du solide des couleurs en volumes, dont chacun représente une couleur spécifique. C'est la dimension de la palette, déterminée par la finesse du découpage du solide initial, qui définit la capacité perceptive des couleurs du système. L'agencement du découpage, ainsi que la structuration du dictionnaire des couleurs, suit des critères fondés sur la perception humaine des couleurs.

D'une façon générale, la segmentation, ainsi que la reconnaissance s'appuient sur des représentations spécifiques de l'espace des couleurs. Nous considérons que ces deux représentations ( $R_1$  et  $R_2$ ) et ne sont pas nécessairement identiques mais qu'elles font partie d'une chaîne ( $R_0, \dots, R_n$ ) de représentations de la couleur, sous-jacente au système de vision [5]. Dans CAICOU, nous distinguons une hiérarchie de représentations comme cela est montré dans la figure 5. Les représentations sont obtenues grâce à des transformations ( $T_i$  dans la figure) désignées par les traits épais.

#### 3.1. SYSTÈMES DE COORDONNÉES DE COULEUR

La segmentation a été implantée selon un modèle mono-composante dans l'espace R, V, B. Le choix de

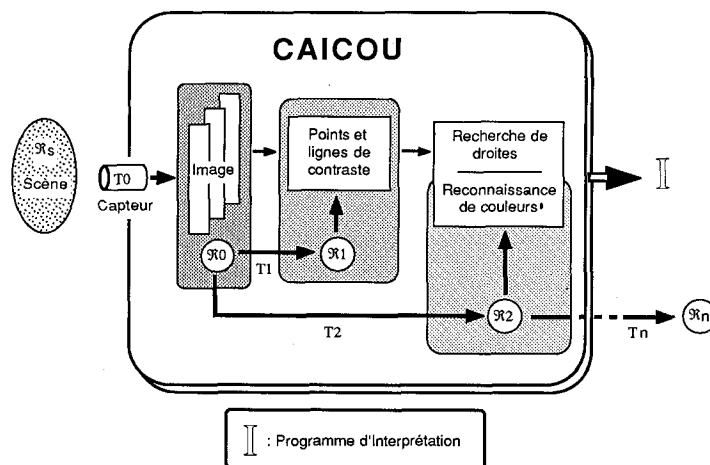


Fig. 5. — Représentations de la couleur.

la composante doit utiliser des connaissances sur la scène. Il se base sur des considérations concernant la couleur du fond qui apparaît dans l'image et le contraste relatif à la couleur de l'objet à extraire.

La décision se fait au niveau de l'interprétation; l'exemple suivant montre l'appel à la segmentation pratiqué pour un fil jaune :

```

Pour tout fil Jaune :
Si Fond (Blanc) alors
  Segmenter-sur-plan (Bleu)
sinon
  Segmenter-sur-plan
  (Contraste-maximal (Rouge, Vert))
  
```

La vérification du Contraste-maximal se fait pour un nombre réduit de points.

Cette méthode implique un coût de calcul très réduit comparé à l'inspection des trois composantes, ou aux calculs impliqués par l'utilisation des espaces transformés. Cependant elle s'avère inefficace pour des images plus complexes où le contraste entre les surfaces projetées est plus difficile à prédire.

Pour la reconnaissance, le système de coordonnées colorimétriques utilisé est le modèle TLS<sup>(3)</sup>, qui traduit la perception humaine des couleurs par les notions de Teinte, Luminance et Saturation. La Luminance décrit l'intensité lumineuse d'une couleur. La Teinte traduit la propriété chromatique caractéristique d'une couleur, permettant sa désignation en relation avec les couleurs de base. La Saturation rend compte de la quantité de lumière blanche diluée dans la couleur. Ces composantes sont calculées selon les relations :

$$T(R, V, B) = \arctan 2(\sqrt{3}(V-B), 2R - V - B)$$

$$L(R, V, B) = \frac{R + V + B}{3}$$

$$S(R, V, B) = \text{Si } (L(R, V, B) \geq L_{BI}/2) \text{ alors}$$

$$1 - \frac{3 \min(R, V, B)}{R + V + B}$$

sinon

$$1 - \frac{3 \min(1-R, 1-V, 1-B)}{3 - (R + V + B)}$$

R, V, B variant de 0 à 1.

$L_{BI}$  dénote la luminance maximale qui correspond à la couleur blanche.

La figure 6 illustre le modèle résultant, qui est représenté par un double cône. La Luminance est portée par l'axe achromatique qui traverse longitudinalement le modèle. La Teinte (Hue) est donnée par le déplacement angulaire sur le plan chromatique construit par la coupe transversale du modèle. Notre repère chromatique varie entre 0 et  $2\pi$ , le point de cassure se trouvant dans la couleur Cyan. La Saturation mesure la distance d'une couleur vers l'axe achromatique.

Nous avons utilisé l'approche classique pour le calcul de la teinte et de la luminance, conservant ainsi l'instabilité de la teinte près de l'axe de luminance. Nous considérons ce paramètre dénué de signification pour

<sup>(3)</sup> HLS en anglais : Hue, Luminance, Saturation.

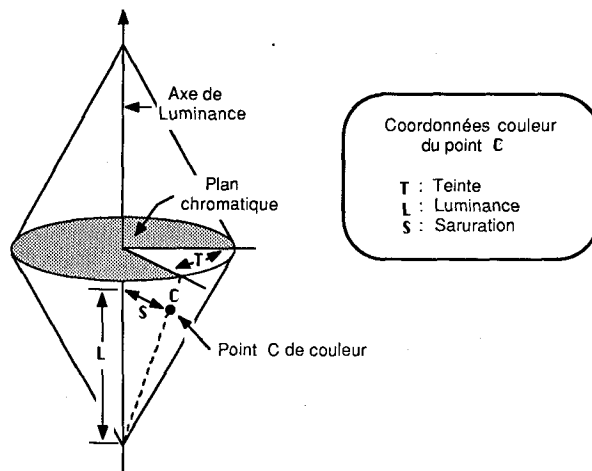


Fig. 6. — Modèle colorimétrique TLS.

les couleurs « achromatiques » (voir fig. 8), qui se placent dans les pics du modèle et autour de l'axe de luminance (ce qui correspond respectivement au noir, au blanc et à la gamme des gris). Par contre, nous avons cherché à stabiliser le calcul de la saturation quand les trois composantes sont proches de 0, tout en conservant la base du calcul proposée par Tenenbaum et Garvey [14]. Ce calcul a la particularité d'être économique, et son implantation matérielle a été déjà présentée par [1].

### 3.2. RECONNAISSANCE DES COULEURS

La couleur est une caractéristique d'homogénéité des régions, dont le degré se mesure par l'évaluation statistique des paramètres de couleur. Dans le cas de l'identification de fils électriques, les régions sont limitées par les lignes de contraste extraites pendant le suivi de lignes doubles. La représentation fournie par le processus de segmentation, consiste en l'ensemble de « droites de couleur » qui définissent le squelette coloré du fil.

La reconnaissance de la couleur, selon le principe de l'analyse incrémentale propre à CAICOU, a été implantée comme un automate à trois états (fig. 7). De façon similaire à la segmentation des lignes, l'automate prend en entrée les valeurs de couleur des points milieu fournis à chaque pas de l'opérateur de suivi double. Les états de l'automate sont :

État 0 : État de départ où la couleur est inconnue.

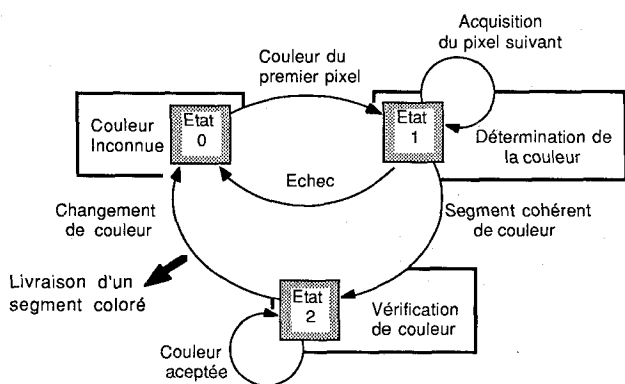


Fig. 7. — Automate de reconnaissance de couleurs.

L'ensemble des descripteurs est initialisé. Le passage à l'état 1 s'effectue dès l'arrivée du premier pixel à identifier.

**État 1 :** Détermination de la couleur. Cet état dure un nombre prédéfini de pixels consécutifs, et calcule le comportement statistique de chacune des composantes couleur. En sortie, il rend un segment cohérent de couleur qui comporte une valeur moyenne et l'écart-type pour chaque composante. Une validation est effectuée sur les écarts, et l'une des trois composantes est choisie comme « paramètre dominant ». Si la validation échoue, l'automate retombe à l'état 0 de la couleur inconnue.

**État 2 :** Vérification de la couleur : le parcours est suivi en vérifiant que les composantes couleur se trouvent entre les limites établies dans l'étape précédente. Quand un changement de couleur est détecté, le segment coloré en cours d'analyse est délivré et l'automate se remet à l'état 0, en vue d'identifier un prochain segment.

La variation dans une couleur se détermine d'abord à partir des variations du paramètre dominant, selon la relation :

*La couleur change si :*

(le paramètre dominant change *ou* les deux paramètres auxiliaires changent).

La définition des paramètres dominant et auxiliaires implique un ordre dans les composantes couleur. Cet ordre guide la discrimination des couleurs et influence le passage des couleurs vers leur représentation symbolique. Dans la section 4 nous discutons l'ordonnement des paramètres qui est à la base de cette heuristique.

La variation de couleur signifie la terminaison d'un segment coloré. Le segment ainsi complété est envoyé au processus d'analyse et l'automate se remet à l'état 0.

#### 4. Représentation symbolique et nomenclature des couleurs

Le modèle TLS sert de passage entre la représentation numérique et la représentation symbolique de la couleur. Une des principales propriétés de ce système est la séparation immédiate entre couleurs chromatiques et achromatiques (cf. fig. 8) :

- Les couleurs achromatiques, comme il a été dit, sont portées par le vecteur à luminance équi-composée. On y trouve le noir, le blanc et la gamme des gris.

- Les couleurs chromatiques, comprenant toute la gamme des couleurs hors de l'axe, définies par leurs coordonnées sur le plan TS construit par la teinte et la saturation.

Lors de notre expérimentation, nous avons pu constater que la caractérisation et la vérification d'une couleur, appartenant à l'une de ces familles, sont guidées principalement par un des trois paramètres du système de coordonnées TLS. C'est ainsi que la famille d'appartenance détermine le paramètre qui guide la reconnaissance d'une couleur donnée.

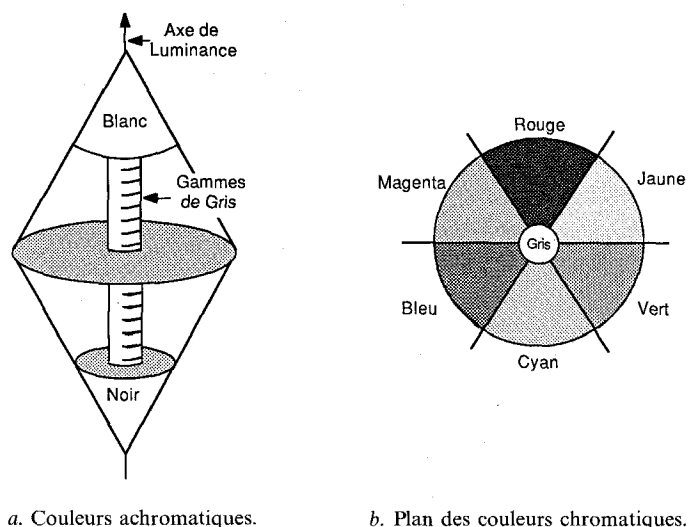


Fig. 8. — Caractérisation des couleurs.

##### 4.1. COULEURS ACHROMATIQUES

Pour les couleurs achromatiques, la luminance est le seul paramètre déterminant. Du fait de l'instabilité de la teinte près de l'axe achromatique, il suffit de vérifier que la saturation ne prend pas de valeurs significatives.

Nous avons déterminé des paramètres précis pour définir d'abord le blanc et le noir en utilisant la luminance. Ensuite, le gris est caractérisé au moyen de la saturation (fig. 8 a).

*Choix :*

Luminance  $> 0,78 L_{\max}$   $\Rightarrow$  blanc

Luminance  $< 0,24 L_{\max}$   $\Rightarrow$  noir

Saturation  $< 0,05 S_{\max}$   $\Rightarrow$  gris

sinon  $\Rightarrow$  couleur chromatique

$L_{\max}$  et  $S_{\max}$  sont la luminance et saturation maximales dans le repère normé.

##### 4.2. COULEURS CHROMATIQUES

La teinte est la composante la plus significative dans l'analyse des couleurs chromatiques. Les relations de Kender [8] :

$$\text{Teinte (R, V, B)} = \text{Teinte (q R, q V, q B)},$$

et

$$\text{Teinte (R, V, B)} = \text{Teinte (R - k, V - k, B - k)}$$

(pour toute valeur des constantes  $q$  et  $k$ ) établissent respectivement l'invariance de la teinte par rapport à la luminance et à la saturation, ces deux derniers paramètres étant plus sensibles aux variations introduites par les différents facteurs de prise de vue tels que : les ombres, les différents niveaux d'éclairage et les reflêts, si l'on considère uniquement le cas d'une source de lumière blanche. En colorimétrie industrielle, ce fait se traduit par l'établissement de tolérances plus strictes dans les variations de teinte par rapport aux variations de luminance et saturation.



En suivant le travail de Judd et Wyszecki [7], nous distinguons les *variations perceptibles* et les *variations acceptables* d'une couleur. La modélisation des variations perceptibles d'une couleur se fait par la définition de zones de variation dans un espace de couleur  $L^*, a^*, b^*$  (fig. 9), espace qui traduit les notions TLS de la perception humaine des couleurs dans un modèle uniforme :

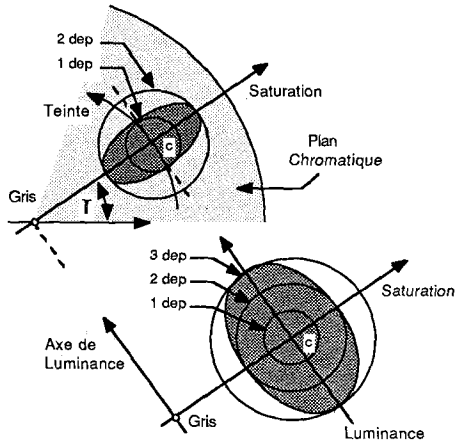


Fig. 9. — Modélisation des variations d'une couleur.

Les variations acceptables sont exprimées en unités de différence exacte perceptible : dep (jpd : just perceptible difference). Dans la figure 9, la zone hachurée correspond à la gamme de différence acceptable. On remarque la faible variation acceptable pour la teinte, comparée aux variations permises pour les deux autres composantes.

Nous avons adapté ces définitions directement à l'espace TLS, pour la phase de détermination de la couleur : nous calculons la teinte et sa variance  $\Delta T$  en ajustant cette dernière aux valeurs d'acceptabilité. La saturation étant la composante la moins stable dans le processus d'acquisition, nous ordonnons les variations permises selon la relation :

$$\Delta T \leq \Delta L \leq \Delta S$$

Choisir la teinte comme paramètre dominant implique qu'un changement dans la couleur est déterminé par une variation sensible dans ce paramètre dominant, ou bien, par une variation importante des deux paramètres auxiliaires. La seule variation de la luminance ou de la saturation ne saurait décrire un changement de la couleur perçue.

### 4.3. DISCUSSION

La qualité du modèle TLS est connue. En effet, il permet le passage immédiat à une représentation symbolique des couleurs grâce à la nomenclature colorimétrique de Munsell. Dans cette méthode, le modèle TLS est transformé dans un graphe qui décrit la discrétisation du solide des couleurs. Le graphe est composé de trois niveaux équivalents aux paramètres

couleur. Chaque nœud dans ce graphe porte un nom. Le nom d'une couleur particulière provient de la concaténation de trois nœuds des niveaux différents.

Notre palette considère uniquement les couleurs primaires et complémentaires (fig. 8 b), délimitées sur le plan chromatique TS par des sections d'isoteinte de surface identique. Les variations sur la gamme de luminance qualifient une couleur comme foncée, claire, ou neutre. La saturation sert seulement à distinguer entre les couleurs chromatiques et la gamme de gris.

## 5. Identification de fils électriques

Une application importante traitée dans notre laboratoire a mis en évidence la nécessité d'une prise en compte de l'information couleur : il s'agit de l'identification de fils électriques en vue de l'assemblage automatique de connecteurs. Nous avons déjà illustré les développements précédents à l'aide de cette application, ce paragraphe-ci en donne un aperçu global.

Étant donné un câble avec ses brins isolés, le problème traité se décompose en trois parties qui relèvent de domaines techniques différents :

1. La localisation et l'identification de fils.
2. La saisie et le dénudage-sertissage, et
3. L'insertion dans le connecteur.

Ici, nous sommes intéressés uniquement par la localisation et l'identification des fils, qui font appel aux compétences visuelles du système.

L'utilisation de l'information couleur est fondamentale, car elle détermine l'emplacement final des fils dans le connecteur, selon un code prédéfini (exemple : noir pour la terre, bleu la synchro, etc.). La méthode choisie se base sur l'utilisation de la vision stéréoscopique.

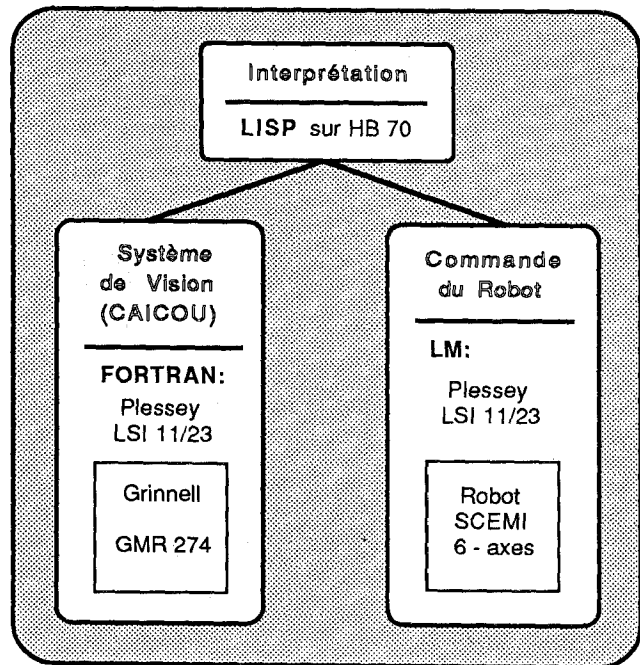


Fig. 10. — Structure du matériel pour l'assemblage de fils.

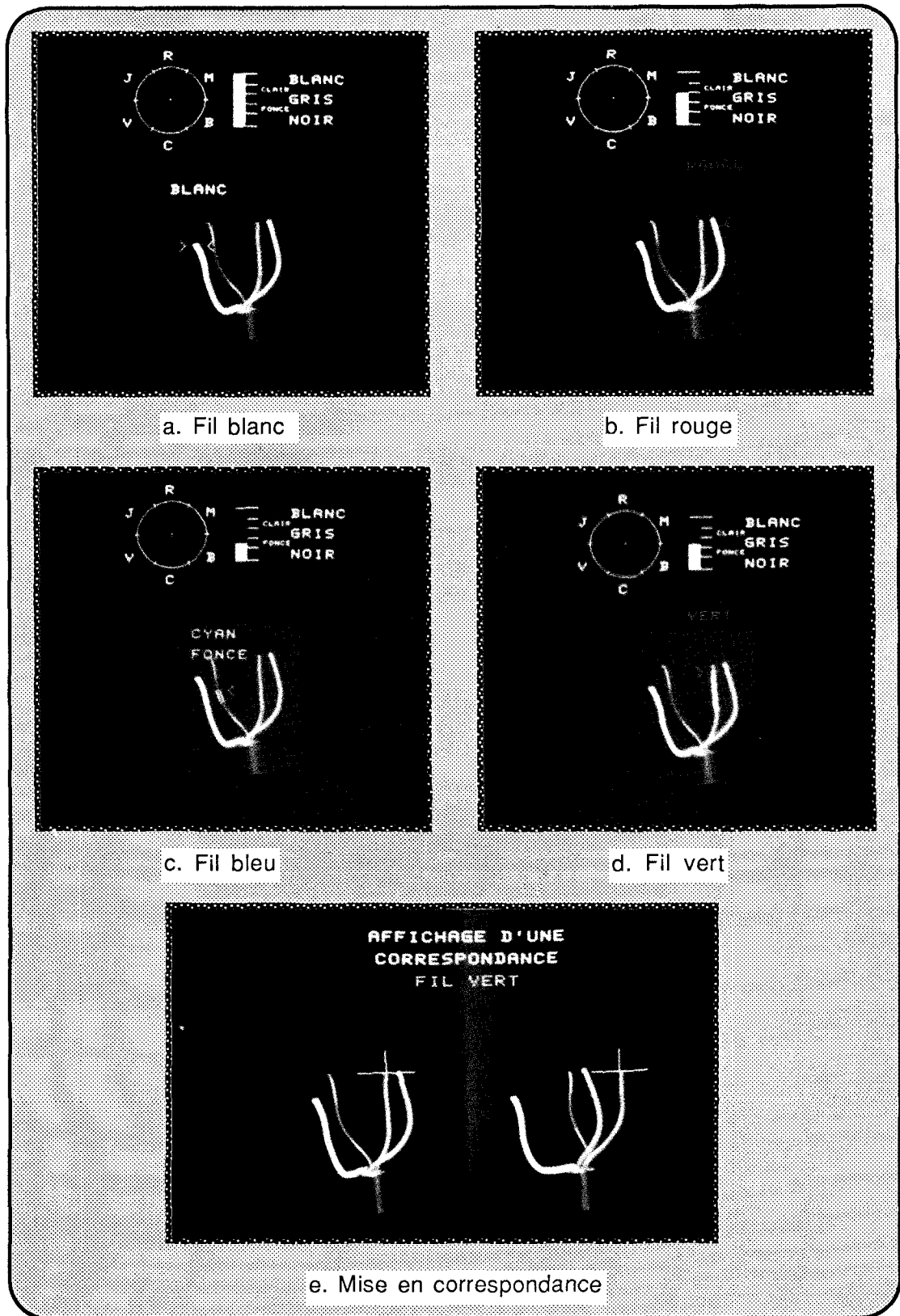


Fig. 11. — Analyse des fils.

que couleur. L'identification et la localisation de fils se déroule en deux phases :

- D'abord, CAICOU extrait les IVs dans les deux images : sommets (parmi lesquels figurent les projections des extrémités et des croisements des fils), et lignes doubles avec des attributs de linéarité et couleur. Ce procédé correspond à la squelettisation des fils, et a pour but de fournir une représentation symbolique de leur projection.

- Ensuite, l'interprétation conduit à la reconstruction de la structure 3D des fils, en particulier par la correspondance des caractéristiques trouvées dans les images stéréo.

La vision couleur est indispensable pour cette méthode, puisqu'elle résout la contrainte d'ordre dans l'assemblage et fournit des indices fiables au processus de correspondance stéréo.

L'étape finale d'analyse consiste en la transmission au robot des coordonnées de chaque fil, pour effectuer leur manipulation.

La configuration matérielle utilisée pour notre application, comprenant l'interprétation, la vision et la commande du robot, apparaît dans la figure 10. En ce qui concerne CAICOU, il se compose d'un numériseur d'images GRINNELL couleur GMR-274, avec trois plans de mémoire image R, V, B de 256 niveaux d'intensité par plan, et quatre plans graphiques. Pour l'acquisition des images dans le contexte de fils, nous avons utilisé une caméra noir et blanc Aaton. Le matériel de calcul s'agence autour d'un micro-ordinateur LSI 11-23 comportant deux disques durs et une carte de communication DRV-11.

La prise d'images en couleur se fait par éclairage successif de la scène avec les trois couleurs primaires. Pour l'analyse d'images stéréoscopiques, le capteur décrit par [2] est utilisé.

Le logiciel de CAICOU est écrit en FORTRAN, avec certains sous-programmes d'échange écrits en assembleur.

Les photos qui précèdent, de l'écran de CAICOU, illustrent les diverses étapes de l'analyse; les photos *a* à *d* prennent l'exemple d'un seul câble avec plusieurs brins de différentes couleurs. Elles décrivent la reconnaissance de la couleur pour chaque fil, l'analyse étant illustrée de façon graphique par l'affichage d'une coupe sur l'axe chromatique, explicitant le rapport teinte et saturation, et par un « thermomètre » des valeurs de luminance. Cet ensemble de valeurs permet la sélection d'un nom dans notre dictionnaire, nom qui dans les photos apparaît sur le fil en cours d'analyse. La photo *e* contient la squelettisation finale d'un fil, à chaque segment de droite étant associés les attributs de couleur.

## 6. Conclusion

Nous avons présenté le système de vision en couleur CAICOU, qui permet l'extraction d'Indices Visuels contraste et couleur, et l'application particulière à l'identification et localisation de fils.

Nous considérons plusieurs transformations intervenant dans les diverses étapes du processus de reconnaissance des couleurs (cf. schéma 5). La première, au niveau du capteur, code la gamme de fréquences dans l'espace RVB.

Ensuite, la transformation  $T_1$  amène à un espace dont les composantes sont discriminées par l'importance de l'information qu'elles portent, fournissant la base de la segmentation. Bien que la transformation de Karhunen-Løve remplisse ces conditions, nous lui avons préféré le simple choix dans les composantes RVB, moins coûteux en calcul, et mieux adapté dans le cas de notre application. Par contre, la représentation dans l'espace TLS ne saurait servir de base solide à la segmentation [8].

$T_2$  considère la création d'un espace colorimétrique propre à la caractérisation des objets segmentés pour l'éventuelle prise en compte d'une signification symbolique. L'espace TLS et ses variantes se révèlent être le seul modèle satisfaisant pour cela.

Des opérateurs intégrés destinés au calcul en « temps réel » de ces deux transformations, ont été récemment présentés respectivement par [12] et [1].

Il faut souligner que la plupart des applications actuelles de la VO couleur se contentent d'une interprétation non sémantique, pour laquelle l'implantation d'un système d'analyse comportant un seul de ces processeurs est envisageable.

Dans l'application présentée dans cet article, la couleur et ses attributs symboliques constituent un point crucial d'analyse, analyse qui a été rendue possible grâce à l'implantation d'algorithmes incrémentaux simples et efficaces sur un support logiciel spécialisé dans la vision de bas niveau.

## Remerciements

L'auteur a été supporté financièrement par le Conseil National de Science et Technologie (CONACyT) du Mexique. Il tient à remercier Yves Demazeau, Augustin Lux, Ignacio Ocadiz-Luna, Jocelyne Pertin-Troccaz et Pierre Puget, pour leurs observations pertinentes et pour leur patience à déchiffrer les différentes versions du manuscrit.

*Manuscrit reçu le 19 décembre 1986.*

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] J. BAJON, M. CATTOEN et S. D. KIM, Techniques de transformations colorimétriques en temps réel implantées sur un modèle de vision pour la robotique, *Actes de la conférence MICAD-85*, Paris, février 1985, p. 76-86.
- [2] Y. DEMAZEAU, A stereoscopic vision sensor for robotics: use, design and calibration, *15th International Symposium on Industrial Robots*, Tokyo, September 1985, p. 357-365.

- [3] Y. DEMAZEAU, Niveaux de représentation pour la vision par ordinateur : indices d'image et indices de scène, *Thèse Doctorat*, INPG, Laboratoire LIFIA/IMAG, Grenoble, décembre 1986.
- [4] Y. DEMAZEAU et J. L. GORDILLO, A color stereo vision system applied to wire identification and localization, *4th Canadian CAD/CAM and Robotics Conference*, Toronto, June 1985, p. 12.1-12.8.
- [5] J. L. GORDILLO, Color representation for a vision machine, *2th International Conference on Machine Intelligence*, London, November 1985, IFS (Conferences) Ltd.
- [6] J. L. GORDILLO, *CAICOU : Un système de développement interactif pour l'analyse d'images en couleur*. Rapport de Recherche, IMAG n° 641, LIFIA n° 39, mars 1986.
- [7] D. B. JUDD et G. WYSZECKI, *Color in business, science and industry*, John Wiley and Sons, 3th Ed., 1975.
- [8] J. R. KENDER, *Saturation, Hue, and Normalized color : calculation, digitalization effects, and use*, Department of Computer Science, Carnegie Mellon University, 1976.
- [9] A. LUX, Un système pour le développement interactif d'algorithmes d'analyse de scènes, *Congrès AFCET Automatique*, Nantes, octobre 1981, p. 323-333.
- [10] A. LUX, Algorithmique et contrôle en vision par ordinateur, *Thèse d'État*, Laboratoire LIFIA/IMAG, Grenoble, septembre 1985.
- [11] A. LUX et J. L. GORDILLO, Synthetizing vision programs from robot task specifications, *The 3rd International Symposium on Robotics Research*, Gouvieux, France, October 85, MIT Press, p. 149-154.
- [12] I. OCADIZ-LUNA, Analyse en composantes principales d'une image couleur, *Thèse Doctorat*, INPG, Laboratoire LTIRF/ENSERG, Grenoble, octobre 1985.
- [13] Y. OHTA, A region-oriented image-analysis system by computer, *Ph. D. Thesis*, Department of Information Science, Kyoto University, March 1980.
- [14] J. M. TENENBAUM, T. D. GARVEY, S. WEYL et H. C. WOLF, *An interactive facility for scene analysis research*, SRI Artificial Intelligence Center, Technical Note 87, January 1974.
- [15] S. W. ZUCKER, Region growing : childhood and adolescence, *Computer Graphics and Image Processing*, 5, 1976, p. 382-399.