

# Un Logiciel d'Analyse Automatique de la Structuration de Figures Géométriques Acquises en Ligne.

C. Rémi\*, M. Amara\*, P. Courtellemont\*\*, D. de Brucq\*

\*La3i – Université de Rouen – France,

\*\*L3i-Université de La Rochelle-France.

celine.remi@univ-rouen.fr

## Abstract

*In this paper, we present a method for the automatic analysis of the spatial and temporal structuring of drawings produced by primary school children. At first, this method realizes a description of the layout by geometric features, allowing a simple, fast and effective coding. Thereafter, a step of features clustering is performed thanks to various techniques like Hough transform. This phase allows to identify all the parts of the layout that have contributed for the construction of each segment composing the figure. A tool based on this method was used to study the strategies adopted by a hundred children to draw a same figure.*

## Résumé

*Nous présentons une méthode d'analyse automatique de la structuration spatiale et temporelle de schémas produits par des enfants en école primaire. On réalise une description géométrique de la figure permettant un codage simple et efficace. Puis une étape de classification des descripteurs est réalisée à l'aide de diverses techniques comme la transformée de Hough. Cette phase permet d'identifier tous les éléments qui ont contribué à la construction de chaque segment composant la figure. Un outil logiciel a été mis au point pour étudier les stratégies adoptées par une centaine d'enfants ayant dessiné la même figure de Meulenbroek.*

## 1 Introduction

L'écriture joue un rôle toujours plus important dans notre société. D'abord d'un usage purement administratif et religieux dans les civilisations anciennes, elle s'est démocratisée pour devenir un moyen de communication usuel à la base de tout échange. L'acquisition de l'écriture pour laquelle il existe de très fortes exigences nécessite un long apprentissage. La qualité du tracé, l'orthographe, la grammaire, l'organisation du récit, sont des critères dont la maîtrise nécessite un apprentissage spécifique.

Pourtant, l'exploitation efficace des connaissances de haut niveau permettant de communiquer par écrit, suppose que l'activité graphique soit automatisée, le mouvement aisé et la trace graphique lisible. Le retard qui apparaît chez un enfant dans le langage écrit peut provenir de problèmes au niveau de la motricité fine. Par conséquent, pouvoir détecter assez tôt un dysfonctionnement graphomoteur constitue un enjeu important dans la lutte contre le retard scolaire. Or, actuellement, il n'existe aucun système pour une évaluation complète et objective des compétences graphomotrices de l'enfant en France. Arriver à mettre un place un tel système suppose de connaître le *processus de formation de l'acte d'écriture*. Pour ce faire, il faut disposer d'instruments permettant d'enregistrer des informations relatives à la fois à la trace graphique et à l'acte de production.

Nous proposons de nous intéresser à des caractéristiques liées aux composantes motrices impliquées dans la production de différents types de tracés chez l'enfant de scolarité primaire. Dans ce but, avons défini un protocole expérimental proposant divers exercices à l'enfant. Lors de son élaboration, nous nous sommes attachés à lui donner une forme ludique pour que l'enfant ne soit pas démotivé au cours de la passation. Cette dernière comporte deux parties. La première ne comporte que des épreuves de dessin ou d'écriture de mots isolés. La seconde partie invite l'enfant à produire du texte manuscrit dans différentes conditions, les compétences motrices nécessaires à la réussite lors de la production de tracé variant en fonction de la tâche proposée. En prenant en compte des activités de complexités différentes, espère mettre en évidence les caractéristiques reflétant des aspects de plus en plus évolués et complexes de la compétence grapho-motrice.

Cela représente une masse importante de tracés à traiter. Par conséquent, il est nécessaire de mettre en place un système d'analyse automatique des tracés. Ce système doit être capable de reconnaître la structure du tracé, à partir du signal résultant de l'acquisition. Pour étudier la graphomotricité, il faut analyser à la fois la trace graphique et les aspects dynamiques de son exécution. Seule l'acquisition en ligne offre ces possibilités. La spécificité de ce type d'acquisition résulte du fait que nous ne

disposons pas d'une image, comme dans le cas des tracés hors ligne numérisés au moyen d'un scanner, mais d'un signal enregistré suivant l'ordre de réalisation.

#### *Matériel d'acquisition et logiciel de saisie*

Le matériel utilisé pour l'acquisition est composé d'une tablette CALCOMP DRAWINGBOARD III reliée à un ordinateur de type compatible PC. Cette tablette permet d'échantillonner un tracé en offrant la possibilité de mesurer au cours du tracé la pression exercée sur le stylo ainsi que l'inclinaison et l'orientation de ce dernier.

Nous utilisons une version du logiciel ANATRACE [1] adaptée à notre application. Ce logiciel permet de visualiser la trajectoire du stylo, de connaître la durée des pauses lorsque le stylo est demeuré à moins de 2 cm de la tablette, la pression exercée sur le stylo, ainsi que son inclinaison et son orientation au cours du tracé. Nous pouvons également connaître le temps total nécessaire pour réaliser un tracé même lorsque le scripteur a tenu à certains moments le stylo éloigné de plus de 2 cm de la table au cours du tracé. Ces divers enregistrements occasionnent une taille considérable des informations enregistrées lors des 16 tracés réalisés à chaque passation. ANATRACE permet de visualiser l'exécution du tracé en différé suivant différents modes : ralenti, points liés, avec points de proximité, en temps réel ou pas à pas. Nous avons intégré une nouvelle option permettant de visualiser également l'évolution des différentes caractéristiques dynamiques au cours du tracé. Enfin, une option supplémentaire permet également d'activer une tâche concourante de comptage de clics sonores aléatoires lors de l'acquisition. L'émission des bips peut être réalisée soit de manière arbitraire, soit en prenant en compte le temps maximum pris auparavant par le sujet pour réaliser une tâche d'écriture.

#### *Objectifs*

Lors de la passation, les enfants sont amenés à réaliser des dessins et à produire du texte manuscrit. Notre objectif est d'extraire automatiquement de ces tracés des descripteurs.

Pour automatiser cette phase d'extraction, il faut dans un premier temps être en mesure d'identifier la structuration des données enregistrées lors de l'acquisition. Dans ce papier, nous prenons comme exemple l'analyse de la figure de Meulenbroek [2] que l'enfant doit reproduire dans l'une des épreuves du protocole choisi. L'observation du dessin produit (figure 1) nous permet immédiatement d'identifier les formes correspondant aux différents segments du modèle proposé à l'enfant. L'être humain est capable de percevoir la structuration du tracé. De ce fait, il peut, par comparaison au modèle présenté, évaluer le respect des proportions ou encore le respect de l'agencement des formes : c'est ce type d'informations que le psychologue recueille pour son analyse.

Dans le cadre de la mise en place d'un outil d'analyse automatique des tracés produits, nous sommes confrontés au problème de l'identification des parties correspondant aux différents éléments composant le modèle présenté. Or, la reconnaissance de segments de droite dans les tracés est loin d'être triviale lorsque ces tracés ont été réalisés à main levée, sans contrainte et selon un ordre qui peut être quelque peu déroutant.

Ainsi, lors de la réalisation du dessin représenté en figure 1, l'enfant a représenté les 4 segments du modèle en 21 traits (partie entre un poser et un lever de stylo) selon un ordre qui nous paraît « illogique ». L'enfant s'est attaché à produire d'abord les segments S1 et S2 principalement par de nombreux traits. Mais par la suite, il revient compléter les segments déjà tracés. Par exemple, dans la construction du segment S4, il surcharge par moments le segment S1 (figure 2.a : traits n°10 et 11). D'autre part, certains traits recouvrent plusieurs segments du modèle (figure 2.b : trait n°21), ce qui empêche d'affecter directement les traits à des segments.

L'acquisition fournit 5182 points. Un tel échantillonnage, nécessaire à l'application, fait apparaître une très grande instabilité angulaire au niveau de 2 points d'échantillonnage successifs, empêchant également l'analyse directe à ce niveau de représentation.

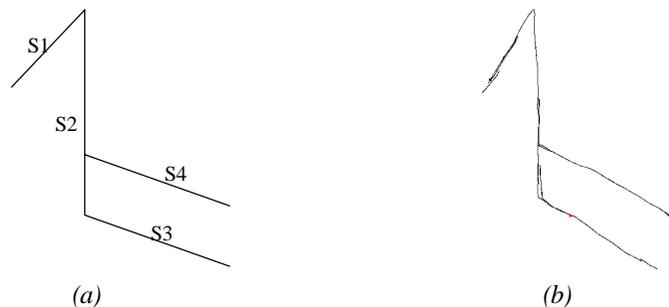


Figure 1 : modèle présenté (a) et tracé produit par un enfant (b).

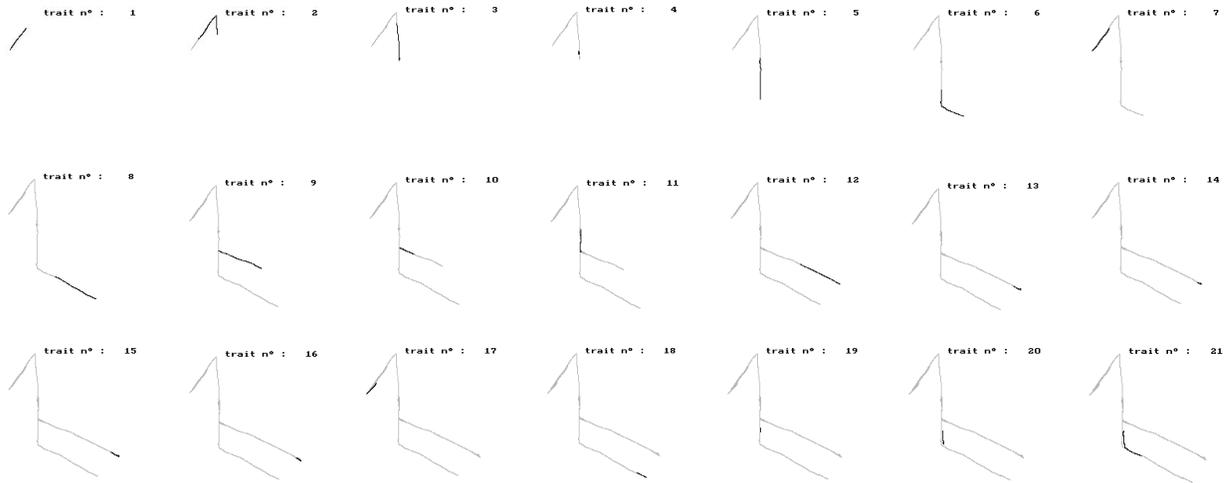


Figure 2 : construction du tracé.

### Stratégie proposée pour la reconnaissance

La figure à analyser est décrite par un ensemble de points sur lesquels nous devons opérer une réduction de données par une description du tracé par des primitives de type segment de droite, sans nuire à la précision, lors des changements de modèles. Il existe de nombreuses techniques pour l'ajustement de segments de droite à une forme, qui peuvent être classées en quatre grandes catégories.

La première regroupe les techniques structurelles. Elles réalisent une polygonalisation du tracé en s'appuyant uniquement sur les caractéristiques structurelles du tracé (présence de point anguleux, etc.). On peut citer la méthode de Hanaki plus connue sous le nom de méthode de la corde, les techniques par suivi angulaire de Berthod [3] ou de Belaid [4]. Mais ces méthodes nécessitent soit de disposer de tous les points pour pouvoir commencer le traitement, soit sont fondées sur l'analyse locale de la distance angulaire entre des points consécutifs au cours du tracé. Or, dans la mesure où les tracés traités sont des courbes échantillonnées, un point peut avoir un voisin consécutif 8-connexe. Il en résulte une grande discontinuité de la distance angulaire d'un point à un autre. En d'autres termes, l'angle perçu à l'échelle macroscopique peut-être totalement différent de l'angle microscopique.

La seconde catégorie de méthodes regroupe les méthodes analytiques déterministes. Ces dernières intègrent le calcul des paramètres des différentes droites possibles pour la description avant de procéder à la sélection de celles qui sont pertinentes. On peut citer la Transformée de Hough ([5], [6]). Ces méthodes sont peu sensibles aux perturbations locales au sein du tracé mais sont en général plus coûteuses en calculs à effectuer.

Une troisième catégorie comprend les méthodes analytiques floues. Ces méthodes introduisent la notion de

flou par l'intermédiaire de coefficients d'appartenance d'un point à une classe (en l'occurrence une droite) donnée. Cette catégorie de méthode comme la précédente nécessite de disposer de l'ensemble des points pour le traitement et n'autorise donc pas un traitement en ligne.

La quatrième catégorie regroupe des techniques statistiques. L'estimation des paramètres des segments est réalisée par la minimisation d'un critère, soit par la méthode des moindres carrés, soit grâce au filtre de Kalman. Elles sont adaptées à un traitement en ligne du tracé. Nous avons choisi d'adopter une approche fondée sur la méthode des moindres carrés pour la phase de description du tracé par des segments de droite. Ce pré-traitement en ligne fournit une description du tracé utilisée dans le logiciel réalisé d'aide à l'analyse.

Le problème de la reconnaissance des 4 segments modèles dans la figure équivaut dès lors, à un problème de classification des segments de droite obtenus. Nous admettons que tous les tracés traités représentent la figure de Meulenbroek et comportent donc les 4 segments modèles.

La première difficulté résulte du fait que nous n'avons pas de connaissance *a priori* sur les caractéristiques des classes. En effet, d'un enfant à l'autre, l'organisation spatiale des quatre segments modèles S1, S2, S3 et S4 varie. Du fait de cette importante variabilité inter-scripteur, on ne peut s'appuyer sur les connaissances *a priori* que nous avons sur la figure présentée à l'enfant. Aussi, pour chaque tracé traité, il est nécessaire d'identifier des modèles de chacune des classes en se fondant uniquement sur la description du tracé. Les classes auront pour caractéristiques celles des modèles identifiés pour chacune d'elle. Ces modèles sont temporaires. Ils ne seront remplacés par des modèles définitifs, définissant les vraies caractéristiques de chacune des classes, qu'après la

classification de l'ensemble des segments par rapport aux modèles temporaires. Dorénavant nous appellerons ces modèles temporaires des germes.

Nous avons choisi de prendre d'abord en compte les caractéristiques spatiales du tracé uniquement, puis celles de la dynamique du tracé et enfin, nous présenterons une méthode reposant sur les caractéristiques spatiales conjointement à la dynamique du tracé. Ces trois méthodes ont en commun d'utiliser la même phase préalable d'estimation des paramètres de droite s'ajustant le mieux à un ensemble de points.

## 2 Méthode spatiale

Cette méthode consiste à parcourir les points d'un trait (partie du tracé comprise entre un poser et un lever de stylo) et à décider lesquels de ces points seront retenus pour la description. Pour prendre cette décision, on calcule la matrice de covariance associée aux points compris entre le dernier point retenu et le point qui précède le point en cours de traitement. Puis on détermine le plus grand vecteur propre de cette matrice. L'angle entre ce vecteur et le vecteur formé par le point précédent et le point courant est calculé. S'il est supérieur à un seuil fixé et si la distance séparant le point courant du début du segment est supérieure à un second seuil, le point courant constitue le début d'un nouveau segment. Sinon, il est considéré comme l'extrémité temporaire du segment en cours de définition. La méthode est ensuite répétée jusqu'au dernier point du trait. La figure 3 montre la description obtenue par 550 segments de la courbe de la figure 1 acquise à l'aide de la table à digitaliser ayant fourni un tracé initial de 5182 points.



Figure 3 : tracé segmenté.

Nous obtenons ainsi un codage du tracé par une liste de segments. Il faut maintenant définir, parmi la liste de segments résultant du codage, les germes utilisables lors de la classification. Les segments étant nombreux, nous avons choisi pour garantir la fiabilité des germes obtenus, de faire voter l'ensemble des segments lors de la phase de sélection des germes.

Nous reprenons le principe de la transformée de Hough classiquement utilisée pour détecter les droites dans une image plan (tracé acquis hors ligne). Nous devons construire l'espace de Hough non plus à partir des paramètres associés à des bipoints mais à partir de ceux associés aux segments issus de la phase de codage du tracé. Pour la détermination des paramètres  $(\rho, \theta)$ , nous avons deux solutions. Soit on calcule les paramètres à partir des coordonnées des vecteurs propres ayant permis la segmentation du tracé lors de la phase de codage. Les paramètres obtenus sont, alors, ceux de droites théoriques auxquelles on ne peut pas associer de points du dessin. Soit le calcul est réalisé en ne tenant compte que des coordonnées des points extrémités des segments issus du codage. Nous opterons pour la deuxième solution, car ce choix garantit à tout moment que la démarche lors de la reconnaissance est fondée sur la prise en compte de modèles existant réellement au sein du tracé.

Le nombre de segments comparé au nombre de pixels des images plan traditionnellement traitées est dérisoire. Par conséquent, nous ne pouvons pas définir un seuil fixe pour l'extraction des 4 directions principales. Pour la formation de pics significatifs, nous pondérons l'incrément des compteurs dans l'espace de Hough par la longueur du segment. Ainsi, une fois l'espace de Hough construit, on retrouvera dans chaque case, non plus le nombre de segments ayant la même orientation, mais la somme de la longueur de tous ces segments. Nous cherchons les 4 pics principaux en partant du plus grand, en négligeant une zone autour de la case correspondant à chaque pic déjà retenu. Il faut trouver un germe pour chaque classe d'appartenance. Parmi les segments qui ont contribué à l'incrément des pics dans l'espace de Hough (figure 4), on ne veut en garder qu'un seul pour chaque classe : nous choisissons le plus grand segment ayant incrémenté le pic. La figure 5 montre pour le tracé de la figure 3, les germes identifiés par cette méthode.

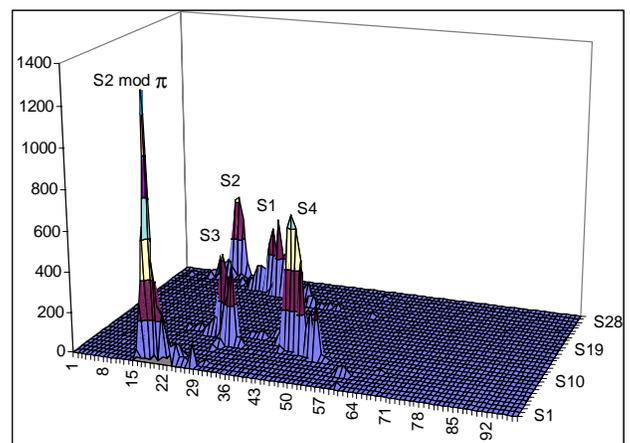


Figure 4 : Localisation des pics dans l'espace de Hough.

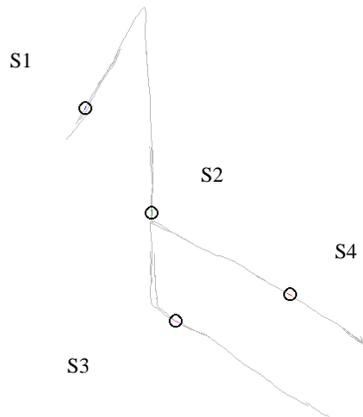


Figure 5 : position des germes

A ce stade nous avons à notre disposition un tracé segmenté et les germes définissant chacun une classe d'appartenance. Il s'agit maintenant de classer tous les segments composant le dessin en fonction de ces modèles d'appartenance.

Nous avons une multitude de segments de longueur, d'orientation et de position variables. Classifier les segments dans le modèle le plus proche conduit à une mauvaise classification du fait de l'importante variabilité des paramètres. D'où l'idée suivante : *On ne classe que les segments dont on est sûr qu'ils appartiennent à l'un des 4 modèles.* Ceci permet de s'appuyer sur les segments déjà classés pour poursuivre la classification en fonction de règles générales garantissant la non violation de ce précepte.

Nous appuyant sur les observations faites sur les tracés, nous avons proposé la procédure suivante pour la classification :

- Rechercher les 4 germes et les classer dans l'ordre chronologique du tracé.

Si le premier germe se trouve dans le premier trait tracé, alors tous les segments compris entre le début du tracé et ce premier germe appartiennent au même modèle.

- Rechercher un seul point de rupture entre ces deux germes, même s'il y a plusieurs traits différents entre les germes. Si on admet que le tracé respecte malgré tout une certaine logique, on va considérer qu'entre deux germes consécutifs chronologiquement, l'enfant n'a représenté que deux modèles.

- Si le dernier germe se trouve dans le dernier trait du dessin, alors tous les segments compris entre ce germe et la fin du tracé appartiennent au même modèle.

Pour déterminer la rupture entre deux modèles consécutifs nous avons en premier lieu pensé à rechercher la plus grande variation angulaire entre les deux germes. Cette méthode s'est révélée inefficace à cause de la présence de petits segments (dus aux hésitations ou tremblements) dont

l'orientation diffère beaucoup du modèle auquel ils appartiennent.

Nous avons envisagé une autre méthode qui consiste à rechercher le meilleur point de rupture. Elle opère en calculant l'erreur de classement par rapport aux germes de référence lors du déplacement du point de rupture entre les deux germes. Pour chaque « essai de point de rupture », tous les segments chronologiquement antérieurs au point de rupture sont associés au premier germe, ceux tracés après le point de rupture sont affectés au deuxième germe. Le meilleur point de rupture entre deux germes est défini comme étant celui qui engendre l'erreur minimale.

### Résultats

L'application de la méthode spatiale sur l'ensemble des reproductions de la figure de Meulenbroek dont nous disposons à l'issue d'une campagne d'acquisition, soit 111, a fourni un taux de reconnaissance de l'ordre de 77,5%. Pour les 22,5% de tracés non reconnus, les causes de l'échec sont souvent dues à une identification incorrecte des directions principales du tracé dans l'espace de Hough. Or, le succès des étapes suivantes repose sur la qualité de cette identification. Par conséquent, dans ce cas les résultats sont faux. Pour certains tracés, il s'est produit une erreur lors de la phase de détection de rupture de modèle. Enfin, dans certains cas, les règles d'appariement étaient en nombre insuffisant pour permettre d'apparier tous les segments. Certains segments ne peuvent être apparés selon aucune règle définie donc aucun modèle ne leur est attribué. Notons que dans ce cas, aucune erreur n'est produite mais le tracé est traité de manière incomplète. Rappelons que cette méthode est fondée sur l'hypothèse d'un minimum de cohérence temporelle du tracé. Les règles introduites pour effectuer l'appariement ont été suggérées par le fait que la plupart des tracés étaient manifestement réalisés de manière « logique ». Par conséquent quand la construction d'un tracé ne respecte pas une certaine cohérence temporelle (exemple : abandon du modèle 2, rajout d'un trait sur le segment 1 puis retour au segment 2), la méthode fournit des résultats erronés.

### 3 Méthode dynamique

Lorsque l'on trace une droite sans lever de stylo, d'une point de vue dynamique, on peut observer une phase d'accélération du mouvement au début du tracé puis une décélération vers la fin. la vitesse absolue, nulle en début de tracé, passera par une valeur maximale avant de tendre à nouveau vers zéro en fin de tracé. Par conséquent, si lors du tracé, on change de direction sans lever de stylo, cela se traduira par un fléchissement de la vitesse au moment du changement de direction.

### Méthode de segmentation

Pour chaque trait du tracé on estime récursivement les paramètres de la droite décrivant le mieux les points tant que la vitesse instantanée est supérieure à un seuil fixé. Si la vitesse passe en-dessous de ce seuil alors on prend pour extrémité finale du segment en cours de définition le point précédent le passage de la vitesse en dessous du seuil. A ce segment, on associe les paramètres fournis par l'estimation. Le détecteur est gelé jusqu'à ce que la vitesse passe de nouveau au-dessus du seuil à partir duquel, l'estimation des paramètres est réamorcée. Nous présentons cette méthode de segmentation sur le tracé utilisé pour l'illustration de la première méthode de segmentation. Rappelons que ce tracé comportait plus de 5000 points. Le résultat obtenu est présenté en figure 6. Le nombre de segments à l'issue du codage est de 22.

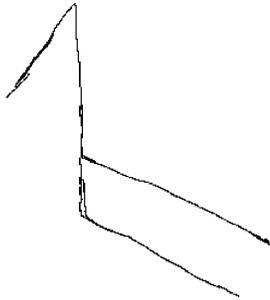


Figure 6 : les 22 segments obtenus.

Pour la classification, du fait du nombre faible de segments, nous devons nous appuyer sur une analyse de l'organisation spatiale des segments faite à partir du modèle.

Les caractéristiques les plus stables des modèles segments sont les suivantes :

- S4 est le segment tels que la distance au coin inférieur gauche du rectangle englobant et l'angle avec l'horizontal sont les plus importants.
- S1 est le segment tel que l'angle avec l'horizontal est le moins important.
- S2 est choisi, parmi les deux restants, comme étant le segment ayant la distance au coin inférieur gauche du rectangle englobant et l'angle avec l'horizontal les moins importants.
- S3 est le segment restant.

Les germes sont définis à partir de ces caractéristiques.

### Classification

Les germes étant identifiés, il faut classer les segments. Le nombre de segments à l'issue du codage étant relativement faible, nous avons utilisé l'algorithme des nuées dynamiques afin d'identifier les segments appartenant à chaque segment modèle. L'utilisation de cet algorithme de

classification automatique, nécessite d'avoir défini, au préalable, l'espace de représentation des données et de disposer sur ce dernier d'une distance exprimant la dissemblance entre les différents éléments à classer.

La figure 7 visualise la distribution des paramètres  $(\rho, \theta)$  correspondant à l'exemple choisi.

Du fait de la variabilité de l'écriture, la variabilité des paramètres, au sein d'une même classe, peut être trop importante et empêcher la séparation des classes. Pour diminuer la variance intraclasse et augmenter la variance interclasse, on décide de transformer l'espace des paramètres de telle sorte que :

- lorsque  $\theta$  petit, pour une variation  $\Delta\theta$  faible, on ait  $\Delta\rho$  faible,
- lorsque  $\theta$  grand, pour une variation  $\Delta\theta$  grande, on ait  $\Delta\rho$  faible.

Afin d'opérer cette transformation (figure 8), nous utilisons deux fonctions  $f(x) = x^2$  et  $g(x) = \arctan(x)$  qui permettent de passer de l'espace des paramètres  $(\rho, \theta)$  à  $(\rho', \theta')$  avec :

$\theta' = f(\theta)$  et  $\rho' = g(\theta^2 + \pi \theta)\rho$

La dissemblance, ou distance, entre deux segments  $s_i$  et  $s_j$  est calculée comme suit :

$$d(s_i, s_j) = \sqrt{(\rho'_i - \rho'_j)^2 + (\theta'_i - \theta'_j)^2}$$

Puisque nous disposons des germes, nous les considérons comme les noyaux initiaux des quatre classes initiales. Puis, chaque segment est affecté à la classe qui minimise la distance  $d$ . A chaque itération, les 4 noyaux doivent être réactualisés. Nous avons choisi de prendre les centres de gravité des classes comme noyaux.

### Résultats

Cette méthode a été testée sur les mêmes fichiers que la méthode de reconnaissance exclusivement spatiale. 94,6% des tracés ont été correctement traités. Nous avons relevé trois causes d'erreurs :

- une mauvaise segmentation par la vitesse. Un changement de direction n'a pas pu être décelé lors de la segmentation par la vitesse avec le seuil fixé,
- une identification incorrecte des germes,
- une mauvaise classification de certains segments.

L'intérêt de cette méthode réside dans le fait qu'elle permet de segmenter un tracé du moment qu'il comporte bien les quatre segments modèles S1, S2, S3 et S4. Mais cette analyse est fondée sur la connaissance *a priori* de la figure présentée à l'enfant. Elle échoue lors de la présence de petits traits de jonction supplémentaires, difficiles à classer.

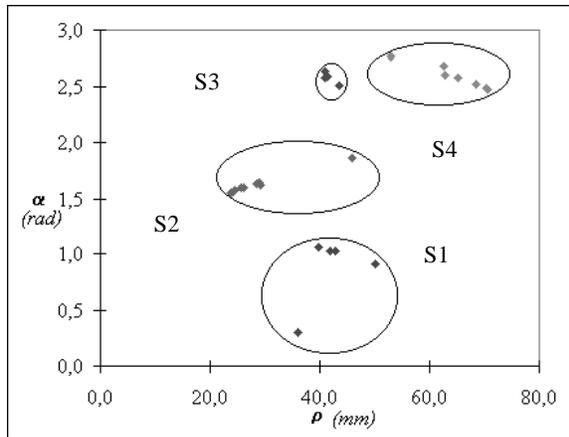


Figure 7 : distribution de  $(\rho, \theta)$  pour un tracé

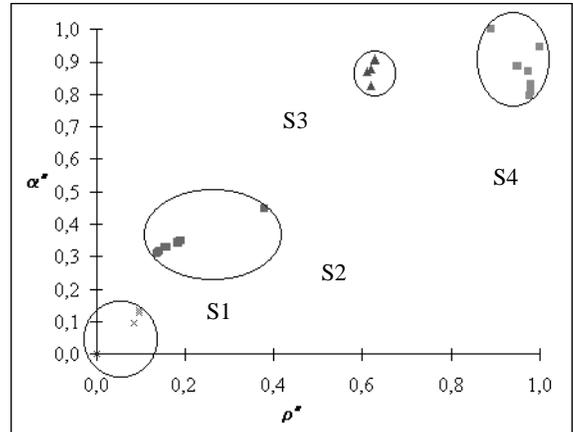


Figure 8 : distribution des paramètres  $(\rho', \theta')$

#### 4 Méthode de reconnaissance retenue

Cette méthode répond à la même stratégie générale que les deux précédentes. Elle comporte donc une phase de description, puis une de sélection des germes et enfin une phase de classification.

##### Description

Nous voulons qu'à l'issue de la phase de segmentation, quelque soit le tracé traité, tous les changements de direction, indiquant un passage d'un modèle segment à un autre soit détectés de manière précise en limitant au maximum les risques de sur-segmentation. Pour quelques traits (partie du tracé entre comprise entre un poser et un lever de stylo) comportant plusieurs modèles segments, il s'avère que les changements de direction indiquant le passage d'un modèle segment à un autre correspondent au plus importantes variations angulaires détectées lorsque la vitesse connaît une période de diminution (vallée). Par conséquent une variation angulaire est significative et doit donc donner lieu à une scission effective du trait, si et seulement si, elle respecte les deux conditions suivantes :

- elle survient lors d'une période de diminution de la vitesse de tracé,
- elle a une valeur supérieure aux autres variations angulaires de cette vallée.

Nous avons implanté une méthode de segmentation en ligne prenant en compte les conditions que nous venons de présenter. On calcule la matrice de covariance associée aux points compris entre le dernier point retenu et le point précédent le point en cours de traitement. Puis on détermine le plus grand vecteur propre de cette matrice. L'angle entre ce vecteur et le vecteur formé par le point précédent et le point courant est calculé. Si l'angle est supérieur à un seuil  $\alpha_s$ , si la distance séparant le point courant du début du segment est supérieure à un seuil  $l_s$  et si la vitesse en ce point est inférieure à un seuil  $v_s$ , le point

courant constitue le début d'un nouveau segment. Les seuils ont été respectivement réglés à 15 degrés, 0.5 cm/s et 2 mm, mais les résultats sont inchangés pour une variation importante autour de ces valeurs. Les changements de direction correspondant à des changements de modèle segment au sein d'un trait ont été systématiquement détectés. De plus, le risque de sur-segmentation dû à la prise en compte de variation angulaire non significative a été considérablement diminué.

##### Identification des germes

Les germes constituent les embryons des quatre classes à identifier. Par conséquent, il est essentiel que ces derniers soient bien sélectionnés. Or, dans le cas de la méthode de reconnaissance spatiale comme dans le cas de la méthode de reconnaissance dynamique il arrive que ces derniers soient mal définis (dans respectivement 4,5 et 0,9% des cas). Il a donc été nécessaire de s'interroger sur les causes de ces échecs en vue de proposer une stratégie plus fiable pour la sélection des germes.

Dans le cas de la méthode spatiale, ces échecs étaient imputables à des facteurs liés à la sur-segmentation du fait de la trop grande sensibilité du détecteur aux déformations locales au sein du tracé.

Dans le cas de la méthode dynamique, nous procédons par analyse de l'organisation spatiale des segments, fondée sur la connaissance *a priori* de l'agencement des 4 axes principaux d'inertie au sein de la figure présentée à l'enfant. Cela induit des erreurs lorsqu'il existe plus de 4 directions possibles pour les segments au sein du tracé analysé, du fait de la présence de petits traits de jonction quasiment horizontaux par exemple.

La méthode de segmentation retenue élimine les problèmes de sur-segmentation. Par conséquent, elle diminue le risque de variabilité intra-classe. Il nous a donc paru judicieux de conserver la transformée de Hough pour la sélection des germes, qui prend en compte la longueur des segments pour décider de la sélection des germes.

Nous avons effectué des tests sur les descriptions obtenues par la segmentation des 111 fichiers de la base. Les germes sélectionnés étaient justes pour l'ensemble des fichiers.

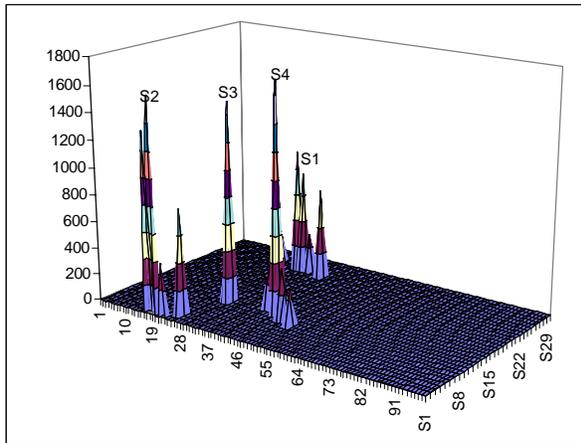


Figure 9 : sélection de germes dans l'espace de Hough.

### Classification

Les deux méthodes de classification présentées auparavant prenaient en compte : soit essentiellement l'organisation spatio-temporelle des segments, soit uniquement la dissemblance des paramètres associés à ces derniers. La seconde méthode fournit une classification correcte dès lors que les germes sont correctement identifiés. Ces deux conditions étant maintenant remplies, nous avons choisi de la conserver dans le cadre de cette troisième méthode. Mais ici, pour initialiser la procédure des nuées dynamiques, les noyaux sont définis comme étant les germes identifiés avec la transformée de Hough, à partir des 36 segments obtenus.

### Résultats

Cette méthode a été testée sur les mêmes fichiers que les deux précédentes. Dans 99,09% des cas, les modèles segments ont été correctement identifiés au sein du tracé (soit pour 110 tracés sur 111). Dans le cas du seul tracé mal reconnu, seul un segment, décrivant un petit trait rajouté après coup par l'enfant pour effectuer la jonction entre le modèle segment S3 et le modèle segment S2, a été mal classé (mis dans la classe S4 au lieu de S3).

### Conclusion

Nous avons pu associer aux composantes d'un tracé effectué par l'enfant, les modèles segments de la figure-modèle. Cette phase était primordiale pour l'analyse automatique de cette figure.

Les aspects retenus dans cette analyse sont ceux pris en compte par les psychologues :

- la linéarité des segments,
- le respect des longueurs des segments,
- le respect des angles entre segments,
- l'orientation du segment S1 (sensé être vertical),
- l'ordonnancement temporel des segments,
- la dysfluente (discontinuité du mouvement évaluée par le nombre d'extrema de la vitesse).

Un module d'extraction automatique des primitives a été conçu en vue de l'intégrer à la version d'ANATRACE que nous utilisons pour l'acquisition. Les procédures que nous avons intégrées offrent d'ores et déjà la possibilité d'extraire automatiquement une grande partie des informations exploitées traditionnellement par le psychologue pour l'analyse des épreuves de type Meulenbroek. La procédure a été reprise pour l'analyse des autres figures composant le protocole, en particulier, la figure de Bender [7]. Cette figure est composée d'un carré sur pointe, accolé à un cercle. Les mêmes outils (transformée de Hough) ont été étendus facilement à cette nouvelle forme géométrique.

La conséquence est que nous en sommes en mesure de fournir un outil fiable et simple d'utilisation pour faciliter la tâche des experts cherchant à étudier l'évolution des compétences motrices des enfants à partir des tracés que nous avons recueillis.

### Références

- [1] AMARA M, COURTELLEMONT P, de BRUCQ D., DEVINOY R., WALLON P., MESMIN C., An analysis software tool for handwriting: writing and drawing application, 8<sup>th</sup> Biennial conference of the International Graphonomics Society, IGS'97, Gènes, Italie, Août 1997, 107-108.
- [2] R. MEULENBROEK, A. J.W.M. THOMASSEN, Exploitation of elasticity as biomechanical property in the production of graphic stroke sequences, Acta Psychologica 82, 313-327, North Holland, 1993.
- [3] M. BERTHOD, P. JANCENNE, Le prétraitement des tracés manuscrits sur une tablette graphique, congrès AFCET, Reconnaissance des formes et Intelligence Artificielle, Toulouse, Septembre 1979, p.195-209.
- [4] A. BELAID, G. MASINI, Segmentation de tracés sur tablette graphique en vue de leur reconnaissance, Technique et Science Informatique, 1982, vol.1, n°2.
- [5] H. MAITRE, Un panorama de la transformation de Hough, Revue Traitement du Signal, vol.2, n°4, 1985, p.30.
- [6] J. ILLINGWORTH, J. KITTLER, A survey of the Hough transform, Computer vision, Graphics Image Processing, 1988, Vol. 4, 87-116.
- [7] BENDER L., Un test visuo-moteur, Paris, PUF, 1957.