J.-P. BENZÉCRI

La reconnaissance des formes : leçon d'introduction en forme de dialogue

Les cahiers de l'analyse des données, tome 6, n° 2 (1981), p. 157-174

<http://www.numdam.org/item?id=CAD_1981__6_2_157_0>

Les Cahiers de l'Analyse des Données
Vol. VI - 1981 - n° 2 - p. 157-174

LA RECONNAISSANCE DES FORMES : LEÇON D'INTRODUCTION EN FORME DE DIALOGUE. [DIALOGUE FORMES]

par J.-P. Benzécri (1)

Au cours de l'année scolaire 1966-1967, une partie de l'enseignement du troisième cycle de statistique (de ce qu'on appelait encore alors la Faculté des Sciences de l'Université de Paris) fut consacrée à la Reconnaissance des formes. Quelques leçons écrites en forme de dialogue, exposaient en les critiquant les vues de deux auteurs russes* dont venait de paraître un intéressant petit ouvrage :

"Обучение машины распознаванию образов"

(L'enseignement de la discrimination des formes à une machine) ; ouvrage dont une traduction anglaise a été publiée depuis. Quant au traitement de l'information (et en particulier au calcul électronique) les moyens dont on dispose aujourd'hui diffèrent grandement de ceux qui existaient il y a 15 ans. Cependant le problème de la reconnaissance des formes n'a toujours pas reçu de solution générale satisfaisante ; en sorte qu'un débat d'idées ouvert en 1966 court encore aujourd'hui. Alors que des recherches récentes (comme celles de Frank et coll. sur l'analyse des images exposées dans le *Cahier* n° 1 de 1981 : cf. pp 101 à 107 ; ou celles, encore inédites de T. Moussa,** sur la reconnaissance de la parole) montrent l'efficacité des méthodes d'analyse de données dont on a depuis longtemps préconisé l'emploi, nous proposons aux statisticiens le texte, multigraphié alors, des leçons de 1966. Toutefois d'une part nous avons retranché la dernière partie consacrée à l'*algorithme des cloisons*, proposé par Arkadiev et Bravermann (et supprimé du début du cours les allusions à cette partie) ; et d'autre part dans les leçons conservées nous avons introduit des notes infra-paginales renvoyant à des textes, qui exposent des idées seulement esquissées dans le dialogue. Nous laissons le lecteur juger si des paroles gelées il y a quinze ans, méritent encore de couler et d'être entendues....

0 Introduction

A.B. Comment distingue-t-on, par exemple, les portraits d'homme des portraits de femme, ou les lettres A des lettres B, voilà une question bien plus complexe et bien plus intéressante qu'il n'y paraît *a priori*. Un point original est que c'est d'après un nombre limité d'expériences (avoir vu quelques portraits, quelques lettres), que nous apprenons à classer un nombre indéfini d'objets...

J.P.B. Un tel apprentissage mérite certes qu'on s'y intéresse... mais il ne faudrait pas en surestimer le succès. Souvent devant un portrait bizarrement coiffé, ou une lettre d'un style insolite, on ne sait que dire ! Ce qui me préoccupe, plus que le problème subjectif de la reconnaissance, c'est le problème objectif de la définition : toutes les

(1) *Professeur de statistique. Université Pierre et Marie Curie*

(*) А.Г. Аркадев & Э.М. Браверман

(**) *Une introduction à ce travail est donnée dans l'article* [*PAROLE I*] *du présent* Cahier.

images ne sont pas des portraits - d'hommes ou de femmes peu importe - tous les gribouillis ne sont pas des lettres. La frontière entre ce qui a une forme (de portrait, ou de lettre...) et ce qui n'est qu'une tache me semble bien plus mystérieuse que celle entre deux formes (entre les hommes et les femmes ou entre les A et les B) *. D'ailleurs ces problèmes peuvent d'autant moins être tranchés par un bref apprentissage que les frontières sont mobiles, (comme les styles et les modes), que l'affectation d'un élément à une classe dépend du contexte où il est placé, c'est-à-dire de sa fonction (tel gribouillis ne peut être qu'un " b" parce qu'il est entre " a" et "ricot"...).

A.B. L'aptitude à reconnaître les formes, comme plus généralement l'aptitude à la généralisation et à la pensée abstraite, ont été jadis considérées comme une prérogative exclusive de l'esprit humain.

J.P.B. Dites plutôt une faculté caractéristique de la vie ! Il est manifeste que l'ours sait reconnaître le miel de la boue, que l'abeille distingue entre la fleur et la feuille... Un autre exemple me vient même à l'esprit : celui du chien qui reconnaît son maître. Il est manifeste qu'ici, bien qu'il s'agisse toujours d'un seul et même maître un vrai problème de classification se pose : parmi un nombre potentiellement infini de situations, reconnaître celles, jamais tout à fait semblables entre elles, où le maître est présent.

Mais au fond est-il même vrai que les vivants soient seuls, dans la nature, capables de reconnaître, de discriminer ? ne peut-on pas dire que l'aimant reconnaît le fer ? Que le corps qui tombe reconnaît le bas du haut ? Nous retrouvons ici le problème que je signalais tout à l'heure : qu'est-ce qu'une forme, quelles classes méritent le nom de forme. Problème aussi difficile sans doute que celui de définir la vie ou l'intelligence. Je ne veux pas m'y arrêter aujourd'hui, je dirai seulement qu'il n'y a pas de forme sans fonction, sans relation , sans fin, et que la hiérarchie des fins ordonne celle des actions et des formes.

A.B. Le projet de construire des machines à reconnaître des formes, suscite un immense intérêt : intérêt pratique (songez à la lecture automatique, au diagnostic automatique, à l'interprétation des photographies aériennes) et intérêt spéculatif (on touche à l'intelligence : peut-être que faire fonctionner des machines nous suggérera de judicieuses hypothèses sur le fonctionnement de notre système nerveux supérieur).

J.P.B. La réciproque n'est pas moins vraie : la neurologie , ou plus encore la psychologie introspective et réflexive (comment, d'après quels indices ai-je résolu tel problème ? Si j'ai commis telle erreur, n'est-ce-pas que d'ordinaire telle information ne me sert de rien ?... etc.) inspirent la science des automates.

A.B. La littérature relative à notre problème témoigne d'une très grande variété dans les points de vue et les sources d'inspiration des chercheurs. Parfois la pratique est en avance sur la théorie : ainsi le fameux perceptron de l'américain F. Rosenblatt a appris à reconnaître certaines images géométriques, avant qu'on ait compris comment il le faisait !

Quant à nous, nous orientons nos études d'après une hypothèse proposée par l'un de nous (E.W. Bravermann) l'hypothèse de la "compacité des domaines".

J.P.B. J'ai lu votre travail : je puis vous dire que vous donnez au mot "compacité" un sens tout autre que celui qui est d'usage parmi

---

* *Nous avons exposé ailleurs, cf.* [*ÂME*] *in* Cahiers *Vol V n° 2 pp 229-242 1980, qu'à la différence d'une simple propriété logique, une qualité définie par la limite d'un filtre peut n'avoir point de contraire.*

les mathématiciens. Peu vous importe que, dans l'espace de configuration, l'ensemble des points qui représentent des objets d'une même forme soit fermé et borné, ce que vous souhaitez c'est que cet ensemble soit aussi régulier que possible, par exemple qu'il soit convexe, qu'il soit connexe (d'un seul tenant) et simplement connexe (sans trous) ; et ce afin qu'aux diverses formes correspondent des domaines facilement séparables. Je prendrai donc la liberté de traduire toujours "régularité" là où vous dites "compacité".

A.B. Notre conception nous a permis de concevoir les machines , que nous allons décrire, et de suggérer des voies pour améliorer ces machines, déjà expérimentées par E.W. Bravermann, O.A. Bačkirov , et I.B Mučnick. De plus nous pouvons expliquer le fonctionnement des machines construites à l'étranger.

Pensant être utiles aux biologistes, aux psychologues, aux médecins, tous lecteurs que rebute la littérature de cybernétique mais qui s'intéressent vivement à la reconnaissance des formes, nous nous sommes astreints à n'utiliser qu'un appareil mathématique très élémentaire.

J.P.B. Belle occasion pour moi d'intervenir afin de reconstruire dans un espace de Hilbert ce que vous nous avez fait voir sur une planche à dessin !

A.B. Nous ne prétendons pas ici être exhaustifs , nous voulons seulement étudier l' "hypothèse de régularité des domaines", en l'illustrant parfois d'exemples empruntés à divers auteurs. A côté de notre méthode qu'on peut appeler géométrique, il y a place pour les probabilités et la statistique (cf. références [9] à [13]).

J.P.B. En effet plutôt que de définir un domaine (disons pour fixer les idées, de R^n) qui soit celui des objets de la première forme, et un autre qui contienne les objets de la deuxième forme, il est très utile de donner la loi de probabilité du point de R^n associé à un objet de telle ou telle forme. Prenons un exemple, aussi simple que précis, un exemple qui a beaucoup intéressé les chercheurs : la détection des signaux (cf. notre cours de psychophysique *). Soit un veilleur qui observe une aiguille sur un cadran afin de déclencher l'alerte en cas d'incident. Supposons que l'aiguille a des fluctuations normales, qui ne correspondent à aucun incident , et que ces fluctuations peuvent être parfois plus grandes que les variations significatives correspondant à un véritable incident. Il est impossible de déterminer ce qu'il en est d'après la seule position de l'aiguille : il n'y a pas d'angle frontière θ_0 tel que :

$$\theta > \theta_0 \Leftrightarrow \text{normal}$$

$$\theta < \theta_0 \Leftrightarrow \text{incident}$$

Mais il y a des probabilités qui peuvent être connues avec plus ou moins de précision et, surtout, sous diverses formes. Nous distinguerons ici deux formes :

1°) Hypothèses bayesiennes complètes : on connaît la loi du couple aléatoire (θ,e) (θ, nombre réel, angle repérant la position de l'aiguille ; e, état du système prenant l'une des deux valeurs 0, ou "normal", et 1 ou "incident") ; autrement dit on connaît les deux probabilités π_0 et $\pi_1 (= 1 - \pi_0)$ que le système soit en état normal ou perturbé ; et dans chaque état on connaît la loi de probabilité continue de θ :

* [DETECTION], *in* Cahiers *Vol IV n° 4 pp 405-412 ; 1979*

$$p^0(\theta)d\theta = p(\theta/e = 0)d\theta$$

$$p^1(\theta)d\theta = p(\theta/e = 1)d\theta$$

On peut alors, étant donnée une politique de déclenchement d'alerte, connaître la probabilité qu'une observation prise au hasard conduise à une alerte justifiée, à une fausse alerte, à un incident non signalé, ou enfin à une absence d'alerte en absence d'incident.

2°) Hypothèses partielles : on connaît les lois $p^0(\theta)d\theta$ et $p^1(\theta)d\theta$, mais non les probabilités π_0 et π_1. Il est seulement possible de calculer, e.g. la probabilité qu'un incident vrai soit signalé par une politique donnée d'alerte, mais non la probabilité qu'une observation (dont on ne suppose pas qu'elle corresponde à un état donné du système : "normal" ou "incident", 0 ou 1) conduise, e.g. à une fausse alerte.

Nous ne développerons pas ici de calculs, mais notons sur cet exemple que le problème de la reconnaissance des formes (ici l'état d'une machine, d'après un cadran) se pose aussi quand on n'a pas assez d'information pour le résoudre à coup sûr (si habile que l'on soit). Il y a tout de même alors quelque chose à faire : trouver une règle de décision qui minimise le risque. Et, quand les informations sont assez abondantes mais qu'on manque d'une méthode efficace pour les exploiter complètement sur une machine à reconnaître les formes, le problème se pose à nouveau de concevoir du moins un appareil qui, en l'état de la technique, fasse le moins d'erreur possible (ou commette les confusions les moins fâcheuses).

Mais les probabilités ne nous servent pas seulement à calculer des risques, elles sont un élément essentiel de la structure même du domaine étudié. Soit donnée une centaine de points dans R^{10} : c'est là un "nuage" qui a un centre de gravité et des axes principaux d'inertie : (le premier de ces axes, par exemple, donne la direction principale d'allongement du nuage etc.) ces axes sont un système de référence naturel pour notre problème. Nous ne répéterons pas ici une fois de plus tout l'intérêt que nous voyons dans les méthodes d'analyse factorielle ou, (autres termes aussi mal définis que celui d'analyse factorielle dont ils sont à nos yeux quelque peu synonymes), d'analyse multidimensionnelle (en anglais *"multivariate analysis"*), d'analyse discriminante...

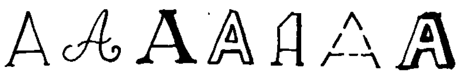
A.B. Il importe d'avoir de bons critères de descriptions des objets à reconnaître. Dans notre dernier chapitre nous proposons une voie à explorer. Signalons aussi notre bibliographie qui offre au débutant quelques références représentant divers points de vue.

J.P.B. Le problème des critères, des systèmes de description est en effet essentiel. Nous avons parlé, jusqu'ici, des objets à classer comme si c'étaient des points de R^n (sur chaque objet on effectue n mesures). Mais le problème principal est de trouver le bon codage : à la limite, si le codage est bon, la reconnaissance des objets peut être immédiate : la "régularité des domaines" est telle qu'à chaque forme correspond un point unique, ou un tout petit îlot bien détaché.

1 *La notion de forme*

A.B. Ce que nous percevons du monde extérieur, nous le classons: c'est-à-dire que nous rangeons les objets, les situations, les événements en classes formées de termes semblables. Et pour diverses raisons se trouvent rapportés à une même classe des objets fort divers :

ainsi tous ces dessins sont des A :



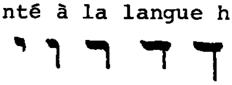
J.P.B. J'ajouterai encore ces signes-ci : a a α
L'unité d'une classe ne procède pas toujours de l'unité des apparences: elle peut résulter de l'unité des fonctions.

A.B. Ce qu'il y a de remarquable c'est que d'après quelques images on puisse apprendre à reconnaître les A qui forment un ensemble potentiellement infini.

J.P.B. Je ne suis pas un structuraliste fanatique, mais je crois devoir vous dire que pour reconnaître proprement les A, il faut, en fait connaître tout l'alphabet. Voici un exemple emprunté à votre langue : ce que nous écrivons D vous l'écrivez d'une sorte de Δ :

(qui vous vient en effet des Grecs, mais par un style d'écriture orné); or ce signe, pour un latin, est un A bizarre. De par l'existence de cette lettre, la frontière du A n'est pas la même chez vous qu'elle ne l'est chez nous. Pourtant, toutes les lettres imprimées soit chez nous soit chez vous pour représenter un "A" sont parfaitement reconnues et chez nous et chez vous pour être des "A" : en sorte qu'un apprentissage basé sur ces seules lettres (et non sur les autres, les D etc.) ne permet pas de connaître ce qu'est la forme du A en russe et en latin. Ce qui, dans un objet, est, pour user de la terminologie des linguistes, pertinent (appartient à la forme non aux caprices du style) ne peut être connu qu'au sein du système (d'un ensemble d'objets de formes diverses). Bien plus il peut arriver que la définition d'une forme soit purement relative : si j'écris :

vous lisez dans les deux cas "ardoise" et pourtant le "a" du premier mot n'est pas moins haut que le d du second : mais il y a dans le premier mot un d si haut, dans le second un a si ras que, le contexte aidant on ne peut s'y tromper. On le voit ici, a et d peuvent être définis non en eux-mêmes mais par les rapports qu'ils ont entre eux. De même, en musique "être une noire" c'est "être le double d'une croche" et "être la moitié d'une blanche" rien de plus... Encore un exemple, emprunté à la langue hébraïque : les cinq signes



représentent cinq lettres distinctes : la longueur de la queue verticale, la portée horizontale et le type de l'angle sont ici trois traits pertinents (dont toutes les combinaisons n'existent pas dans l'alphabet: par exemple il n'y a pas de

si on rencontrait ces dessins, on pourrait tenter de les rapporter à la lettre la plus proche!). Les artistes de l'époque baroque, qui gravaient volontiers des inscriptions hébraïques, ont ainsi rempli nos églises de fautes d'orthographe!

A.B. Il s'en faut de beaucoup qu'étant donné un ensemble quelconque d'objets, la connaissance de quelques uns de ceux-ci permette de reconnaître tous les autres pour être de la même classe. Ainsi je puis avoir vu cent photographies de "lecteurs de ce livre" : je n'en serai pas plus capable de décider, au vu d'un portrait, si l'on me présente un de nos lecteurs!

Il y a donc des ensembles d'un type spécial, ensembles tels que d'après quelques individus un homme (ou un animal) en connaisse le tout. Ces ensembles nous les appellerons des "formes".

J.P.B. Soit. Mais remarquez que le "lecteur de ce livre" est une forme, en votre sens, pour des hommes (on sait parfaitement ce qu'est un homme qui a lu ce livre...): seulement ce n'est pas une forme pour des photographies. Disons donc qu'un seul ensemble peut être formellement bien défini à un certain niveau (au niveau, e.g., de toute la vie d'un homme) mais ne pas l'être à un niveau inférieur (au niveau des seules photographies) : le problème est de savoir si les informations, les descriptions considérées suffisent ou non à révéler la forme. Je ferai encore une autre réserve : mieux que comme un ensemble d'individus (extension), une forme est donnée comme un ensemble de propriétés (compréhension) ; et en particulier, au niveau des objets géométriques qui nous intéressent le plus, ces propriétés sont des rapports entre parties d'un tout organisé. L'état présent des recherches techniques sur la reconnaissance des formes ne doit point nous dissimuler la vraie nature d'un problème encore à peine abordé! Dans l'avenir il faudra bien que nous considérions "avoir une forme donnée" comme autre chose que " avoir un point figuratif dans un convexe donné de R^n". Vous le dites d'ailleurs bien dans la suite, mais je veux le souligner dès maintenant.

A.B. Voici des exemples de formes : "les hommes", "les portraits de femme", "les portraits de Pouchkine", "les tableaux de Vrubel", "les lettres a", "les chiffres 5". Nous pouvons dire qu'il s'agit là de formes parce que pour reconnaître un nouvel individu, on ne le compare pas mentalement à tous ceux qu'on a déjà rencontrés, on le rapporte plutôt à une représentation générale qui s'est constituée dans notre esprit , d'après quelques individus.

J.P.B. Il me semble que vous pensez, comme moi, qu'un ensemble a une forme (vous disiez "est une forme") si au niveau des informations, des descriptions que l'on en a (et que l'on traitera sur un ordinateur ou une autre machine semblable) il peut être défini. L' "extension" suffirait à définir un ensemble déterminé (fini ou infini), seule la "compréhension" nous donne la forme (d'un ensemble potentiel) auquel d'après certains critères on peut décider d'agréger les individus qui se présentent à nous *).

A.B. Sans la reconnaissance des formes, il n'y aurait pas de vie possible. Notre mémoire ne serait qu'un amas d'images individuelles auxquelles chaque nouvel événement ne pourrait être qu'étranger, car rien ne se reproduit tout à fait identique à soi-même : ainsi les lettres imprimées elles-mêmes diffèrent par le style ou seulement l'encrage,... et que dire des situations!

J.P.B. Sans l'abstraction de types formels à partir des données individuelles, pas de pensée en effet. Bien plus si les choses n'avaient pas de forme (ordre, fonction, permanence de certains rapports...) l'univers en lui-même, ne serait que chaos!

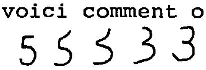
A.B. Pour reconnaître une forme nouvelle, il faut apprendre. On considère divers objets qui relèvent de cette forme, et dont - cela est essentiel - on sait qu'ils en relèvent. Pour apprendre à distinguer Mozart de Šostakovič on va au concert écouter leurs oeuvres, et on regarde le programme!

* *Cependant l'analyse factorielle par la représentation simultanée des individus i, et des propriétés (ou critères) j permet de découvrir la compréhension d'une forme, à partir des descriptions d'un échantillon d'individus qui relèvent de l'extension de cette forme.*

J.P.B. Je souligne, avec plaisir, que vous parlez de deux compositeurs à la fois, et non plus d'une seule forme (e.g. d'une seule lettre). Mais, comme vous le notez vous-même à la fin de votre livre, apprendre une classification déjà faite par d'autres n'est qu'une partie du problème des formes. Il est intéressant au plus haut point d'apprendre à classer des objets qui nous sont présentés non étiquetés. Pour définir des classes dans un domaine nouveau, on peut, à supposer que tous les objets en aient été codés comme des points de R^n, examiner comment ces points se groupent en ilôts "réguliers" (à moins qu'ils ne s'échelonnent sur une ligne, ne s'étalent sur une surface, cf. notre traité sur l'Analyse des Données...). J'ajouterai que, avant tout codage dans R^n, les objets nouveaux sont distingués d'après les rapports qu'ils ont à des objets déjà classés : par exemple on les classe en "agréables" et "désagréables" car on sait déjà ce que sont plaisir et douleur. C'est suivant ces réflexions qu'on a entrepris l'étude de l'analyse factorielle des correspondances, dont le programme est, en bref, de répartir en classes deux ensembles I et J (ou plus généralement de reconnaître la structure de I et de J) d'après le nombre de fois que chaque $i \in I$ a été en relation (en un sens variable suivant les applications) avec chaque $j \in J$: par exemple pour classer des mots (ensemble I) on comptera le nombre de fois qu'ils ont été employés par les personnages (ensemble J) d'une pièce donnée (je vous renvoie à : Pratique de l'A. des D. en Linguistique pp 14, 35, 68).

A.B. La notion de forme est objective en ce sens que diverses personnes qui ont appris à reconnaître telles formes d'après des échantillons différents d'objets, classeront généralement de même un nouvel objet qui leur est inconnu.

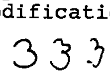
Il ne faut cependant pas dissimuler qu'il y a place au doute car les formes, en quelque sorte s'étalent, la frontière en est indécise. Par exemple voici comment on passe insensiblement du 5 au 3 :



Comment pourrait-on s'accorder sur une frontière précise ?

J.P.B. Je vous l'ai bien dit : on ne peut parler d'une forme, sans devoir parler de plusieurs ; on ne peut parler d'objets qui ont une forme sans que ne s'introduise le chaos indéfini des objets informes...

A.B. Nous supposerons cependant les domaines de forme bien définis, disons par l'avis de la majorité d'un jury. En tout cas notons que certaines modifications :



ne nuisent nullement à la reconnaissance de la forme.

J.P.B. C'est qu'elles ne touchent à rien d'essentiel, de pertinent ; nous en revenons au système des formes, évoqué déjà avec votre delta, et les lettres hébraïques.

A.B. Les images sont inégalement stables quant à la forme : au milieu de notre ligne (qui va du 5 au 3) un petit trait suffit à incliner vers le 5 ou le 3 une figure indécise!

J.P.B. Bien plus : non seulement certains objets, mal dessinés, sont particulièrement instables, mais aussi certaines formes sont elles-mêmes, de par la structure du système, instables : un petit trait fera d'un "o" un "d" ou un "q" mais un "g" ne dérapera pas si aisément.

A.B. De ce point de vue les notions logiques diffèrent grandement des formes. Entre "être un triangle" et "être un cercle" (au sens rigoureux analytique des termes), il n'y a pas de milieu. En revanche d'un dessin de triangle à un dessin de cercle on peut passer par gradations, par déformations insensibles. On voit la différence entre la notion d'objet triangulaire et le concept mathématique de triangle.

J.P.B. C'est un aspect de la distinction entre "logique" (discontinu), et "analogique" (continu) *.Poincaré notait la difficulté propre de l'arithmétique : les nombres entiers se suivent et rien ne permet de généraliser les propriétés de " n " à son successeur "n + 1 "; en géométrie ou en analyse au contraire la continuité aide à notre progrès. Du point de vue de la cybernétique la stabilité des structures logiques, indéformables en un certain sens, fait la supériorité des ordinateurs digitaux, où tout est représenté par des suites de "1" et de " 0 ", sur les calculateurs analogiques, où à un nombre, e. g. correspond l'intensité d'un courant. Cependant, dans la réalité sinon dans le schéma des plans, continu et discontinu sont toujours simultanément présents : les " 1 " et les " 0 " des ordinateurs sont, e. g., des zones plus ou moins aimantées sur une bande (un seuil séparant ce qui veut dire " 1 " de ce qui veut dire " 0 ") ; les intensités sont faites d'électrons (discontinus) qui ont une fonction d'onde (continue) etc. .

Certains linguistes pensent que toutes les distinctions pertinentes, qu'il s'agisse de distinguer entre sens de mots ou de reconnaître des phonèmes..., relèvent d'oppositions binaires logiques : opposition inférieur-supérieur, ou bon-mauvais ou actif-passif pour les sens ; opposition sourde-sonore (entre t et d) , occlusive-fricative (entre p et f) pour les sons. Et plus généralement on pourrait dire que pour reconnaître la forme d'un objet, il suffit d'avoir la réponse à un petit nombre de questions auxquelles on ne pourrait répondre que " oui " ou "non". Il n'y aurait plus alors que des formes logiques c'est-à-dire que, comme vous le marquez justement, ce me semble, il n'y aurait plus de formes du tout! Sous cette hypothèse, beaucoup plus radicale que celle de la "régularité des domaines" une forme serait un point de l'ensemble $\{0,1\}^N$ (autrement dit, une suite de 1 et de 0 de longueur N convenable). Quel que soit l'intérêt des structures logiques, discontinues rigides, et leur importance dans nos mécanismes psychologiques , elles ne sont pas les seules structures qui interviennent dans la définition et la reconnaissance des formes. Placer dans un cadre continu les objets et les formes nous paraît indispensable. La capacité des langues à évoluer, par exemple, en témoigne : si les langues n'étaient que logiques comment déformer le latin pour en faire le français ? (Cet argument est bien illustré par l'oeuvre du grand linguiste A. Martinet). Définition et structure ne sauraient s'opposer ici à souplesse. Même si les techniques sont discontinues, l'objet de la reconnaissance a des dimensions qui en font plutôt un "espace" !

A.B. Puisque la notion de forme est une réalité objective, ne peut-on pas confier à une machine des tâches de reconnaissance de formes ? On le peut en effet : on sait déjà construire des machines qui distinguent des dessins simples de lettres et de chiffres. A la vérité point n'est besoin de construire matériellement ces machines pour expérimenter sur elles : il suffit de simuler sur une grande calculatrice électronique, le fonctionnement d'un automate, auquel on présente des objets et qui se modifie - apprend - jusqu'à reconnaître les formes).

Mais ici une question se pose : pour les tâches qui nous intéressent

* *et aussi, cf.* supra *§ 0, entre propriété logique simple, et qualité complexe définie par un filtre.*

(e.g. la lecture automatique de texte imprimé) est-il bien nécessaire de recourir à la science des formes, aux processus d'apprentissage ? Ne suffirait-il pas de fournir à la machine, une fois pour toutes, des types rigides de lettre auxquels comparer les signes à reconnaître ?

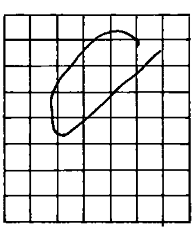
J.P.B. Vous pensez par exemple à une machine, qui recevant le signe à reconnaître comme une suite de 56 nombres $\{x^i\}$, intensités du noir dans les cases d'un quadrillage 8 × 7 recouvrant le signe, et ayant dans sa mémoire les vecteurs $\{A^i\}$, $\{a^i\}$, etc. correspondant au A majuscule au a minuscule etc., calculerait successivement les sommes :

$$\Sigma_{i = 1,\ldots,56}(A^i - x^i)^2, \quad \Sigma_{i = 1,\ldots,56}(a^i - x^i)^2$$

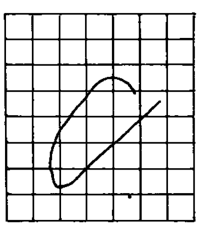
etc., et déciderait "c'est un a" si la deuxième somme est assez petite.

A.B. Une telle machine devrait avoir autant de vecteurs $\{A^i\}$ qu'il y a de variantes typographiques du A majuscule, ce qui suppose une très vaste mémoire ; de plus ces calculs seraient très sensibles aux défauts d'impression.

J.P.B. Pour ne rien dire du problème de cadrage, ni du problème, voisin, de la taille de l'image à reconnaître : il est clair en effet que le vecteur $\{x^i\}$ n'aura pas du tout la même valeur si on place le signe inconnu au centre du quadrillage ou au bord : s'il est tout petit

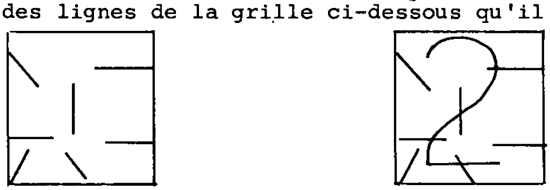


ou



ou s'il remplit le cadre... Cependant il faut retenir ici une suggestion : étant donné un signe x essayer d'en faire une suite de transformés affins (passer de petit à grand est une homothétie : donc une transformation affine : passer du droit à l'italique est aussi une transformation affine...) jusqu'à obtenir un transformé qui ressemble au mieux à l'un des vecteurs-type qui sont dans la mémoire. Une des difficultés dans cette voie est que n'importe quelle lettre convenablement applatie (or c'est là une transformation affine!) devient un I ! Je n'en dirai pas plus ici, bien que le recours aux transformations affines et, plus généralement, aux groupes de transformations, ne soit nullement à écarter *.

A.B. Une autre voie est celle des critères simples. Par exemple des critères d'intersection : un chiffre peut être caractérisé d'après celles des lignes de la grille ci-dessous qu'il coupe :



* *cf. e.g. Frank et coll., in* Cahiers *Vol VI n° 1 ; par rotation puis translation, ces auteurs amènent en coïncidence approximative des images de macromolécules. Un travail inédit de P. Leroy (†1969), poursuivi par Ch. Nora (≈1971) montre de même comment déterminer d'après une vue plane l'orientation d'un objet spatial complexe tel qu'un avion ; nous nous réservons de publier prochainement ce travail.*

La méthode a été appliquée avec quelque succès à la lecture de textes tapés à la machine. Mais l'on ne peut lire ainsi qu'un petit nombre de types de caractères (ceux des quelques machines en vue desquelles les critères ont été conçus).

J.P.B. Il s'agit ici de caractères binaires, logiques : la lettre coupe-t-elle ou non une telle ligne ? Mais ces caractères ne sont pas les traits pertinents propres à la structure étudiée : ces traits seraient plutôt "avoir une boucle haute", "avoir une queue" etc. . Cependant à défaut de pouvoir reconnaître les queues et les boucles en elles-mêmes, (ce qui est un problème de reconnaissance plus simple que celui de la reconnaissance des lettres mêmes, en ce que les boucles et les queues sont des formes élémentaires; mais plus compliquées, en ce que plusieurs boucles et queues peuvent se trouver à la fois dans le champ de l'appareil de lecture, tandis que moyennant cadrage, on isole les lettres), on les prend au piège, d'après les lignes qu'elles coupent. La méthode perfectionnée grâce au jeu d'une double batterie de critères, a été poussée jusqu'à un haut degré d'universalité dans les recherches du regretté professeur R. de Possel. *

A.B. Toutes ces méthodes ne peuvent guère fournir de machines universelles : et si elles le peuvent ce n'est qu'au prix d'un travail humain considérable de recherche des critères. C'est pourquoi nous nous intéresserons exclusivement ici aux machines capables d'apprentissage ; et ce, dans les conditions suivantes :

a) initialement, la machine ne contient aucune information sur le domaine de formes et d'objets dans lequel on va l'utiliser.

b) au cours de l'apprentissage, on présente à la machine des objets et on lui communique la classe (e.g. le numéro de la classe...) de chaque objet présenté.

c) la machine traite automatiquement les informations qu'elle a reçues...

J.P.B. Vous voulez dire automatiquement, et suivant un programme universel, le même qu'il s'agisse de reconnaître des sons prononcés,ou des oiseaux (pourvu évidemment que ces objets soient codés suivant des suites de chiffres d'une longueur donnée, caractéristique de la machine ; et que le nombre des réponses possibles n'excède pas un N caractéristique, lui aussi, de la machine).

A.B. C'est cela, je poursuis :

d) la machine est alors capable de reconnaître un nombre indéfini d'objets nouveaux, et cela, sinon sans erreurs, du moins avec peu d'erreurs : voilà ce que nous entendons par "une machine à reconnaître".

J.P.B. Je précise, mais cela s'entend, qu'après l'apprentissage la machine est, d'une façon ou d'une autre (par exemple parce qu'elle ne reçoit plus d'informations de classe), stabilisée : elle acquiert un comportement invariable devant les images externes. Mais la même machine peut à nouveau servir à un autre problème de reconnaissance si on la remet en apprentissage sur de nouvelles données en lui fournissant de nouvelles informations. La machine qui cette semaine lit le russe, classera les fossiles la semaine prochaine.

A.B. Du moins peut-on déjà songer à passer du russe au latin . L'essentiel est que l'on dispose d'un critère pour caractériser les ensembles de points qui sont des formes en notre sens : ce critère, que nous avons cherché d'après les formes visuelles, est selon nous l'"hypothèse de régularité du domaine". D'après le critère on peut concevoir

* *Le maître ainsi que son disciple E. Jammati sont décédés depuis.*

des programmes universels, dont la portée dépasse le domaine de la lecture automatique, domaine auquel nous empruntons nos exemples.

On pénètre ici dans un domaine encore inexploré de l'apprentissage des machines. On a déjà étudié des modèles de réflexes conditionnés: mais là, la machine se borne à retenir des associations entre un ensemble fini, donné *a priori*, de stimuli et un ensemble, fini lui aussi, de réponses.

J.P.B. La différence avec la lecture automatique c'est qu'il vient un stimulus à la fois sur une seule de -disons - 30 voies parallèles ; tandis qu'une image c'est un flot simultané de quelques dizaines de nombres (un million, si on avait une grille d'entrée aussi fine que la rétine de l'oeil humain !).Les intensités de noir (sans parler des couleurs) dans chacune des cellules du quadrillage... Mais, dans les deux cas il n'y a qu'un ensemble bien limité de sorties.

A.B. On a aussi des modèles de régulation automatique : mais il ne s'agit en somme que de rechercher le minimum (ou le maximum) d' une fonction. Avec le problème de la reconnaissance des formes, nous voici bien plus près des facultés supérieures de notre cerveau.

J.P.B. Quoique la pensée ne soit pas, selon moi, enfermée dans la matière du cerveau, je regarde avec sympathie les recherches sur l'intelligence artificielle. Jusqu'ici nous n'avions, dans nos entreprises intellectuelles, que les forces naturelles de notre cerveau guidé par notre intelligence, nos intentions. Les nouveaux "outils mentaux" (j'emprunte le terme à un de vos compatriotes, G.N. Povarov, qui a écrit sur l'intelligence artificielle, une remarquable préface à la traduction russe d'un livre de E. Berkeley "*Symbolic logic and intelligent machines*") sont les bienvenus.

Mais la comparaison même avec notre intelligence montre combien est fallacieux l'espoir de réaliser une machine aussi universelle que celle dont, après Rosenblatt, vous nous suggérez le projet. Je pense que, même à supposer la reconnaissance des formes totalement automatique, on devra toujours distinguer entre la recherche des critères , et l'exploitation de ces critères. Qu'il s'agisse d'un domaine déjà divisé en classes ou d'une véritable "*terra incognita*" justiciable d'abord de la classification automatique, la recherche des critères ne peut être que difficile : elle sera donc effectuée sur une machine très puissante. En revanche, une fois les critères trouvés, des machines bien moins coûteuses, pourront suffire à la reconnaissance des formes . Par recherche des critères j'entends, en bref, recherche d'un bon codage des objets du domaine considéré, suivant des points de R^n. Sur ces objets codés il n'est pas exclu que doivent opérer de petites machines point trop différentes des perceptrons ou autres semblables , et en tout cas, comme elles, universelles et susceptibles d'un certain apprentissage. Et j'ajouterai que, quant à moi, c'est la recherche automatique des critères, la classification automatique, l'analyse factorielle etc., qui me fascinent le plus. Mais, dans l'avenir immédiat, les premières machines à reconnaître les formes qui seront en service (ne lit-on pas déjà automatiquement des chèques, dont les chiffres ont, il est vrai, une forme particulière) utiliseront, je n'en doute guère, des critères patiemment recherchés par des hommes !

2 Codage des figures planes : la notion de domaine régulier

2.1 Le codage :

A.B. Une image ne peut être introduite dans une machine que sous forme codée, comme une suite de symboles sur lesquels puisse opérer la machine.

J.P.B. Par machine vous entendez ici un ordinateur logique : en calcul analogique au contraire on peut imaginer d'opérer sur l'image même, laquelle est projetée sur une couche sensible. Par exemple les calculs de comparaison à un type, que nous évoquions plus haut peuvent se ramener à une intégrale double :

$$\int f(x,y)\ g(x,y)\ dx\ dy \quad , \text{ ou :}$$

$$\int |f(x,y) - g(x,y)|^2\ dx\ dy \ ,$$

où $f(x,y)$ est la fonction intensité lumineuse de l'image à reconnaître et $g(x,y)$ la fonction intensité lumineuse de l'image type. Or de telles intégrales pourront être obtenues d'un seul coup, comme une intensité à la sortie d'un dispositif électro-optique où se mélangent les deux images. Je doute que ces techniques puissent suffire à résoudre notre problème, mais elles ont leur place, quand ça ne serait que pour transformer automatiquement une image usuelle en suite de nombres (dans le langage des techniciens cela s'appellerait : conversion électro-optique d'analogique en digital).

A.B. Pour ne rien dire des techniques, on peut songer à bien des formules pour convertir une image en suite de nombres. Un mathématicien songe aux équations des courbes.

J.P.B. Ce n'est nullement pratique !

A.B. Nous avons déjà parlé des critères d'intersection : étant donné n lignes L_i on peut coder une figure F par le vecteur $\{f^i\} \in R^n$, suite des f^i chacun nul si F ne rencontre pas L_i et égal à 1 sinon (ou égal au nombre des points d'intersection).

J.P.B. Mais il peut y avoir des contacts entre L_i et F, des parties communes.

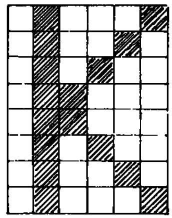
A.B. Le codage le plus simple est celui qu'on obtient en quadrillant l'image, numérotant les cases de 1 à n, et prenant pour i-ème coordonnée f_i de l'image F, 1 s'il y a du noir dans la i-ème case, zéro sinon.

J.P.B. Plus haut nous parlions de prendre pour x_i l'intensité du noir... Mais au fait, n'est-ce pas encore un critère d'intersection particulier: il s'agit non d'intersection avec une ligne, mais d'intersection avec une case. Plus généralement on peut considérer n coordonnées f_i définies à partir de n images ou grilles ou fonction $G_i(x,y)$ par la formule :

$$f_i = \int F(x,y)\ G_i(x,y)\ dx\ dy$$

où $F(x,y)$ est, naturellement, la fonction de deux variables "intensité du noir". Choisir les $G_i(x,y)$ c'est en somme choisir des critères, parmi un très vaste ensemble de critères possibles. Une de nos thèses est que l'analyse factorielle peut guider ce choix ; et fournir automatiquement des critères plus efficaces, plus universels que les critères d'intersection eux-mêmes.

A.B. N'anticipons pas et bornons nous aux quadrillages. Connaissant la suite $\{f_i\}$ de 1 et de 0 qui est la traduction de la figure F, rapportée à un quadrillage, on peut approximativement reconstituer la figure originelle, par exemple comme ceci : (cf. figure ci-contre). les clichés de journaux obtenus avec une trame lâche ont un peu ce caractère de mosaïque.



J.P.B. Les images de la télévision aussi, du moins dans une de leur dimension.

A.B. L'intérêt du codage par quadrillage est qu'il est naturel ; il correspond à la structure en mosaïque de notre rétine.

J.P.B. Voilà qui est vite dit ! La rétine de l'oeil est certes tapissée de cellules sensibles, cônes ou bâtonnets, mais il s'en faut de beaucoup que les informations transmises au cerveau par le nerf optique soient les réponses mêmes des récepteurs de la rétine. Le système nerveux de la rétine comprend une succession de couches de neurones si complexe, qu'on le compare volontiers à un cerveau. J'ai lu* que les influx transmis par le nerf optique concernent notamment les contours, leur position et leur direction approximative : il suffirait pour élaborer de telles informations de calculer le gradient de l'intensité lumineuse (i.e. le vecteur de composantes $\partial F/\partial x$, $\partial F/\partial y$); ce calcul est possible par des différences de réponses d'éléments voisins. Plus généralement il est intéressant de considérer les convolées de l'image F avec ses divers noyaux, i.e. des fonctions telles que :

$$F * N = G(x,y) = \int F(x - x', y - y')\, N(x', y')\, dx'\, dy' ;$$

qui est familier avec la théorie des distributions sait qu'un noyau N convenable (en bref un dipole) donnera pour $F * N$, $\partial F/\partial x$. Voilà encore une nouvelle classe de codages : on substitue à l'image F, une pile d'images $F * N_i$ (qui sont elles-mêmes calculées puis transmises approximativement suivant une mosaïque). Nous pensons que ces méthodes, que la nature applique à sa manière ont aussi leur place dans nos machines: sur la "pile d'images" on peut reconnaître, bien mieux que sur l'image initiale unique, les traits et les boucles qui sont les éléments, les traits pertinents des figures. Sans doute les plus puissants de nos ordinateurs permettent-ils déjà de tenter quelques expériences dans cette voie.

A.B. Pour ce qui est du simple codage par quadrillage il est assez facile à réaliser automatiquement, grâce à une mosaïque d'éléments photosensibles.

J.B.P. On trouve déjà en vente divers organes d'entrée optique, qui peuvent être reliés à un ordinateur. Il existe des caméras de télévision reliées à des ordinateurs... . Mais tous ces dispositifs sont coûteux, et beaucoup de chercheurs perdent encore de longues heures à coder des images**, avant d'essayer leurs programmes.

2.2 *L'espace des récepteurs*

A.B. Sans autres précisions techniques nous parlerons d'un champ de récepteurs pour désigner l'ensemble des cellules de notre mosaïque d'entrée...

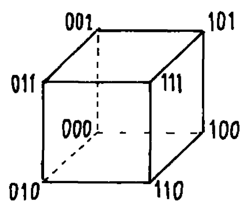
* *Mc Culloch, Pitts et al. : What the frog's eye tells the frog's brain,* in IRE Proc. *T. 47 pp 1940-1951 (1959).*

** *C'est ainsi qu'ont procédé Chaumereuil et Villars ; cf.* Cahiers *Vol VI n°1,1881; le travail cité cidessus de P. Leroy† engendre de telles images d'avions suivant un programme.*

J.P.B. Si le champ compte n récepteurs, une image sera codée par un point de R^n (voire de $\{0,1\}^n$, qui est une partie de R^n, si on n'utilise que des suites de 1 et de 0) et vous direz, pour être bref, qu'une image est un point de R^n. Aux médecins, biologistes, et psychologues, vous avez prodigué vos explications sur ce qu'est R^n : mais je ne crois pas utile qu'on en reparle ici.

2.3 *Ensemble régulier des points*

A.B. Supposons qu'il y ait trois récepteurs : R^n est alors l'espace ordinaire R^3 ; $\{0,1\}^3$ est l'ensemble des sommets du cube unité (ensemble de 8 points dont toutes les coordonnées valent 0 ou 1). Regardons la figure :



les points 111, 011, 110, 101 forment un ensemble A qu'il est facile de séparer par un plan de l'ensemble B des points 000, 001, 010, 100.

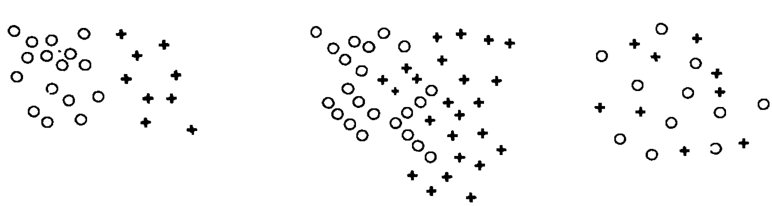
J.P.B. Il suffit de dire que les points de A (resp. B) sont ceux pour lesquels la somme x + y + z des coordonnées est supérieure (resp. inférieure) à 1,5. En revanche, il est impossible de séparer par un plan les deux tétraèdres imbriqués Q et R :

$$Q = \{001, 110, 010, 100\}$$

$$R = \{011, 101, 000, 110\}$$

Selon vous A et B sont des domaines réguliers, mais non Q et R. Il vaudrait d'ailleurs mieux parler de "systèmes de domaines régulièrement disposés", le système étant d'autant plus régulier que les domaines sont plus facilement séparés par des plans (des hyperplans dans R^n).

A.B. Comme il est impossible de faire des figures dans R^n, voici, dans le plan, des exemples de difficultés croissantes



(1) (2) (3)

le problème est ici de séparer les + des 0...).

J.P.B. On peut montrer ici encore l'importance du choix des critères : Imaginons que dans le cas de la figure (3) on ajoute une troisième coordonnée qui soit justement positive pour toutes les croix (+), négative pour tous les ronds (0) : le problème,d'insoluble devient trivial! Ajouter des coordonnées supplémentaires utiles n'est pas si impossible qu'il semble d'abord. Supposons que l'on veuille séparer les points satisfaisant à l'inégalité :

$$x^2 + 30\,xy + x + 4y + 7 > 0,25$$

des points satisfaisant à :

$$x^2 + 30\,xy + x + 4y + 7 < -0,25 \;;$$

l'hyperbole d'équation :

$$x^2 + 30xy + x + 4y + 7 = 0$$

convient bien, mais elle a deux branches et, somme toute elle n'est pas facile à découvrir ! Ajoutons les coordonnées supplémentaires z, t, u qui seront des fonctions algébriques simples des x, y :

$$z = x^2 \quad ; \quad t = xy \quad ; \quad u = y^2$$

(u d'ailleurs ne nous servira à rien, mais il est naturel de l'introduire si l'on passe du premier au second degré !). Dans l'espace à 5 dimensions des x, y, z, t, u il y a un hyperplan de séparation entre nos deux ensembles (relevés suivant des surfaces, sous-variété de dimension 2, de R^5) : c'est l'hyperplan d'équation :

$$z + 30\,t + x + 4y + 7 = 0 .$$

En ajoutant successivement les monômes de degré 3, 4 etc. ; aux coordonnées initiales on voit apparaître dans le nouvel espace de configuration, comme des hyperplans les hypersurfaces de degré 3, 4 de l'espace initial. Or l'on sait que la recherche des hyperplans de séparation est assez simple... Nous avons trouvé dans Sebestyen cette ingénieu transformation algébrique.

A.B. En résumé, voici ma terminologie. Dans le cas binaire, (codage par 1 et 0, dans $\{0,1\}^n$), je dis qu'un point d'un ensemble est frontière s'il suffit de changer une coordonnée pour passer dans une autre forme. Tout point non-frontière est dit intérieur. Il est clair que les points frontières rendent difficile la séparation. Régularité, signifiera donc d'abord,faible pourcentage des points frontières.

J.P.B. De ce point de vue, rien n'est plus irrégulier que le système des deux tétraèdres imbriqués : en ce cas, tous les points sont frontière (en votre sens).

A.B. Cette notion de frontière se généralise au cas des coordonnées continues.

J.P.B. Je l'imagine... Mais il faut se garder de prendre la notion topologique usuelle ! On pourra poser: x est point frontière d'ordre ε pour A_i si $x \in A_i$ et qu'il existe dans le système des ensembles un autre A_j (correspondant à la j-ème forme) qui contient un point y à une distance de x inférieure à ε. Mais ceci nous amène à parler distances : la distance :

$$\sqrt{\Sigma_i \,(x^i - y^i)^2}$$

n'est peut-être pas la mieux adaptée à notre propos. En analyse factorielle le même problème se pose : en effet parler de "direction principale d'allongement d'un nuage" présuppose une distance ; le choix de celle-ci joue un rôle décisif (cf. e.g. la distance particulière utilisée en analyse des correspondances).

A.B. C'est cela. Et une autre condition de régularité sera que pour un ε aussi grand que possible, les ε-intérieurs des A_i (i.e. les points de A_i qui ne sont pas ε-frontières) soient des ensembles connexes remplissant presque les A_i.

J.P.B. Voilà qui est peu rigoureux ! Mais on pourrait dire ceci : Soit $\{A_i\}$ un système fini de parties de R^n (muni de sa distance euclidienne). Notons V la somme, supposée finie, des volumes des A_i. Notons $V_i(\varepsilon)$ le volume de la plus grande composante connexe de l'ensemble $A_i(\varepsilon)$ ainsi défini :

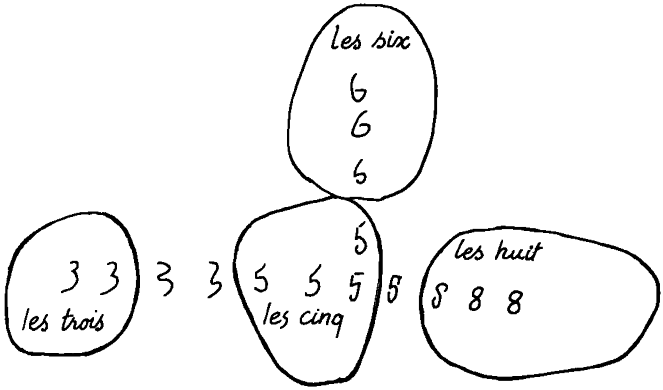
$$A_i(\varepsilon) = \{x | x \in A_i \; ; \; (|y - x| < \varepsilon) \wedge (i \neq j) \Rightarrow y \notin A_j \}$$

Notons $V(\varepsilon)$ la somme des $V_i(\varepsilon)$, et $r(\varepsilon)$ le quotient $V(\varepsilon)/V$; $r(\varepsilon)$ sera un indice de régularité, d'autant plus élevé pour un ε donné que le système des A_i sera plus régulier.

A.B. Quoiqu'il en soit de vos définitions, je pense que la notion de régularité du système, correspond à la facilité de reconnaître les formes !

2.4 *L'hypothèse de régularité*

A.B. Je vous propose d'examiner ce dessin : entre les 3 et les 5 il y a, nous l'avons vu, une zone de figures qui méritent à peine le nom de chiffres ; de même des 5 aux 8 ; au contraire les 5 jouxtent presque les 6. Cependant il me semble qu'on peut définir un système de domaines $A_i (i = 0, 1, ..., 9)$ régulièrement disposés, dont chacun contient une classe de chiffres (les 0, les 1 etc.). C'est ce que représentent mes contours vaguement circulaires.



Il me semble que chaque fois que l'oeil peut distinguer un système de formes, c'est qu'il s'agit, dans l'espace de configuration, d'un système régulier de domaines. Voilà en quoi consiste notre "hypothèse de régularité des domaines".

D'après cette hypothèse, nous serons à même de concevoir des algorithmes pour déterminer des hypersurfaces simples séparant les classes de points relevant des diverses formes. Une fois ce tracé fait (d'après quelques échantillons) reconnaître une forme équivaudra à "placer un point par rapport à un système d'hypersurfaces".

Certes une hypothèse, avant d'être reçue, doit être vérifiée. Une première vérification sera fournie par l'efficacité des algorithmes conçus d'après l'hypothèse. Une seconde vérification consiste à fabriquer des classes artificielles de stimuli visuels, pour s'assurer que l'oeil ne peut apprendre à discriminer ces formes, nouvelles pour lui, que si le système en est régulier (en notre sens). Nous avons en effet composé des mosaïques aléatoires, carrés divisés en 400 cases, chacune peinte soit en blanc soit en noir. Si, partant de quelques figures initiales F_i (e.g. 2 ou 3) on construit des formes $\{F'_i\}$, ou ensembles de figures F'_i qui dérivent de F_i en changeant (du noir au blanc, ou du blanc au noir) environ quarante cases choisies au hasard, on a bien de vraies formes reconnaissables par des hommes.

J.P.B. L'expérience demanderait à être précisée... Mais ce que vous promettez de vos algorithmes m'intéresse davantage !

3 *L'algorithme des cloisons* : N.B. ainsi qu'on l'a annoncé en introduction on ne décrit pas ici en détail cet algorithme : on se borne à le caractériser sommairement en trois répliques.

A.B. Dans l'espace où les descriptions d'objets sont figurés comme des points, les diverses formes (ou classes de descriptions) peuvent être séparées par des hypersurfaces ; nous nous proposons de construire des hypersurfaces de séparation qui soient hyperpolyédrales, c'est-à-dire qui soient faites de portions d'hyperplans. (Dans la suite nous dirons souvent "plans", "polyédre", "surface" pour : "hyperplan", "hyperpolyédre", "hypersurface"). L'apprentissage comprendra trois phases:

1) tracés de plans de séparations, ou "cloisons" ; (système fini de plans divisant l'espace en un nombre fini de régions dont chacune relève d'une seule forme, ou ne relève d'aucune).

2) élimination des places inutiles (simplification du système de séparation, construit d'abord).

3) élimination des portions de plan inutiles (ceci revient à souder en une, les régions limitrophes qui relèvent d'une même forme).

J.P.B. Sans entrer dans les détails, faisons le point. Au cours de la première phase de l'apprentissage, la mémoire de la machine contient non seulement les équations des cloisons déjà tracées, mais aussi les coordonnées des points déjà présentés : sans ces dernières informations on ne pourrait savoir si, en ajoutant une cloison, on sépare correctement tous les objets déjà présentés. Ainsi, au cours de l'apprentissage, la zone de mémoire utilisée s'accroît sans cesse, non tant parce que les cloisons se multiplient (car, pour autant que le programme réussit à séparer les formes, le nombre des cloisons cesse de croître), mais on doit garder tous les points (stimuli, ou objets présentés). Avec d'autres machines, au contraire, telles que le perceptron, les informations nouvelles s'inscrivent toujours, en quelque sorte, dans la même zone de mémoire : plus précisément, on a un réseau de connexions dont les valeurs sont modifiées après chaque essai. Pour user d'une analogie psychologique, le perceptron a un subconscient, que chaque expérience remodèle : votre machine entend dominer consciemment le problème en confrontant toutes les informations qu'elle a reçues.

Pour Rosenblatt (le père du perceptron) l'intelligence est une heureuse rencontre, l'évolution est un chaos d'où émergent les formes les plus réussies. Pour vous l'évolution est un progrès ordonné par l'intelligence.

A.B. Quant aux spécifications techniques, je précise que la rétine d'entrée a 60 (6 × 10) récepteurs : on a dessiné 800 chiffres qui peuvent être 0, 1, 2, 3, ou 5 ; 200 de ces chiffres sont présentés pour l'apprentissage et les 600 restants servent à vérifier l'efficacité de l'algorithme.

Avec la'algorithme que nous avons conçu, le rendement est de l'ordre de 75%. De plus pour décrire le système de cloison auquel on aboutit à la fin de l'apprentissage, il faut environ 3000 chiffres binaires. Ceci veut dire que si, après l'apprentissage, on confiait à une machine plus simple la tâche de reconnaissance, cette nouvelle machine pourrait avoir une mémoire plus étendue.