Qu'est-ce que *voir* ?
Ou comment notre vision est conditionnée par la *camera obscura*

Philippe Matherat
GET - Télécom-Paris - Comelec / CNRS - LTCI (UMR 5141)
http://www.matherat.net/

Résumé

Qu'est-ce que le *virtuel* ? Cette question, posée à l'occasion du Séminaire de photographie de l'École normale supérieure 2004-2005, qui avait pour titre « Latent, virtuel », faisait allusion aux images numériques. Elle était posée en relation avec le mot *latent*, utilisé plutôt dans le cadre de la photographie argentique. Nous avons cherché une réponse en relation avec l'acception rencontrée dans l'expression *mondes virtuels* des jeux video, qui nous semble faire allusion au caractère de fiction de ces mondes. Nous avons cherché en quoi le monde de la réalité pouvait différer de ces mondes virtuels. Comment connaissons-nous le monde extérieur ? La propagation de la lumière joue un rôle très particulier, révélé par la fonction de la *camera obscura*. Nous verrons que nous ne sommes jamais dispensés d'avoir à *imaginer* la réalité, même si notre imagination doit être confrontée au réel. Ce texte est la transcription de l'exposé du 9 février 2005 à ce séminaire.

Sur le site web du séminaire de photographie de l'ENS : http://seminaire.photo.ens.free.fr/, on trouvera la présentation du thème de cette année-là, le programme associé, ainsi que le texte de présentation de notre exposé. Cet exposé a été motivé par le désir de dire notre façon de comprendre l'ouvrage de Monique Sicard, « La fabrique du regard » [1], en le mettant en relation (à notre manière) avec les conceptions de Bertrand Russell dans « Our knowledge of the external world » [2].

Introduction

Notre exposé sera découpé en deux parties bien disctinctes, que nous pouvons considérer, pour l'instant, comme deux exposés :

1. Le premier exposé aura la forme d'un cours d'optique photographique, tel qu'on peut en trouver dans une formation de photographe. Il a entre autre pour objectif de chercher s'il est légitime de traquer le *virtuel* dans la technologie du capteur, en liaison avec le développement récent de la photographie numérique.
2. Le second exposé aura la forme d'un discours critique des concepts utilisés dans le premier exposé. Il cherche à traquer le virtuel d'une autre manière, en cherchant à répondre à la question : *Qu'est-ce que voir ?*

L'articulation entre les deux exposés sera faite par l'étude de la proposition *la lumière se propage en ligne droite*. Dans le premier exposé, cette proposition sera utilisée comme une connaissance de physique permettant de décrire le fonctionnement de la chambre photographique. Dans le deuxième exposé, nous nous interrogerons sur le statut logique de cette proposition, nous verrons que la réalité dépend du langage, et que *voir* dépend du langage.

Nous allons jouer deux rôles différents, prendre deux postures différentes. Mais nous avons besoin de faire ainsi en une seule séance, car les concepts choisis dans le premier exposé seront présentés dans le but de donner une matière au second exposé. En outre, la thèse que nous présenterons ne prendra son sens que dans l'articulation des deux postures.

Le premier exposé est un discours de physique. Le second exposé est un meta-discours sur la physique. Il est aussi un discours qui vient après le discours sur la physique. Enfin, il s'interroge sur les relations entre l'essence des objets et ce que nous en connaissons. Pour ces trois raisons, on peut donc dire que c'est un discours meta-physique.

1 Essai : un cours d'optique photographique

Nous allons essayer de montrer ici que l'essentiel d'un cours de physique sur le fonctionnement d'un appareil photographique peut être dérivé de façon très simple (se résumant à quelques constructions de géométrie élémentaire) de la seule proposition *la lumière se propage en ligne droite*. Notre but est donc de dire quelque chose sur la structure du discours du physicien, et ce pourrait déjà être considéré comme un metadiscours. Mais il nous paraît impossible d'atteindre notre but en nous mettant d'emblée en position *meta*, nous reporterons donc cette position à la deuxième partie. Il nous paraît au contraire indispensable de nous installer dans la posture du physicien, et de faire un cours de physique. Nous n'en montrerons que la trame, et nous renverrons le lecteur à des ouvrages spécialisés pour le détail des démonstrations mathématiques (comme par exemple [3]). Il est hors de notre propos de chercher à avoir un discours exhaustif sur ces questions de physique. Au contraire, nous souhaitons dépouiller ce discours afin de montrer sa structure : l'enchaînement des arguments à partir de l'hypothèse initiale sur la propagation de la lumière. (En particulier, nous ne parlerons pas des phénomènes d'interférences ni de diffraction puisque nous nous plaçons volontairement dans le cadre de l'optique géométrique.)

Un aspect important de ce discours scientifique réside dans le fait qu'il n'est nul besoin de détailler la conception des assemblages de lentilles de verre de l'objectif photographique pour traîter presqu'entièrement ce qu'on appelle *optique photographique*. La quasi-totalité de cette optique peut être traîtée, soit en ne considérant que des appareils sans lentille (un simple trou appelé *sténopé*), soit en ne parlant à propos des lentilles que de leur effet d'*association de points conjugués*.

Une présentation ainsi dépouillée nous permettra d'innover à la fin de ce premier exposé, en montrant que la taille de la chambre est un paramètre qui a beaucoup d'influence, beaucoup plus qu'on ne le croit généralement, sur la profondeur de champ. Les images obtenues sont très différentes lorsqu'on change la taille de la chambre. Le photographe sera donc amené à considérer qu'il s'agit là de son principal *degré de liberté* dans le maniement de l'appareil.

Ainsi énoncée, l'optique photographique semble ne concerner que la "boîte", la *camera obscura*, qui apparaît comme la partie la plus importante de l'appareil photographique. La partie qui enregistre l'image (le capteur) apparaît secondaire, et la transition vers le numérique ne semble pas alors nous donner d'argument pour y trouver du *virtuel*.

1.1 Construction de l'image, perspective

Répétons l'expérience classique de la *camera obscura* : construisons une boîte en carton dont un fond est remplacé par une feuille de papier calque et dont le fond opposé est percé d'un petit trou (d'un diamètre d'un demi-millimètre pour une boîte de 20 centimètres de profondeur). L'image qui se forme sur le calque est faible, visible seulement quand on dirige le trou vers un objet très lumineux comme une fenêtre ou le filament d'une lampe à incandescence (figure 1). Pour mieux voir cette image, il est préférable de recouvrir la tête de l'observateur et la partie arrière de la boîte d'un même voile opaque.

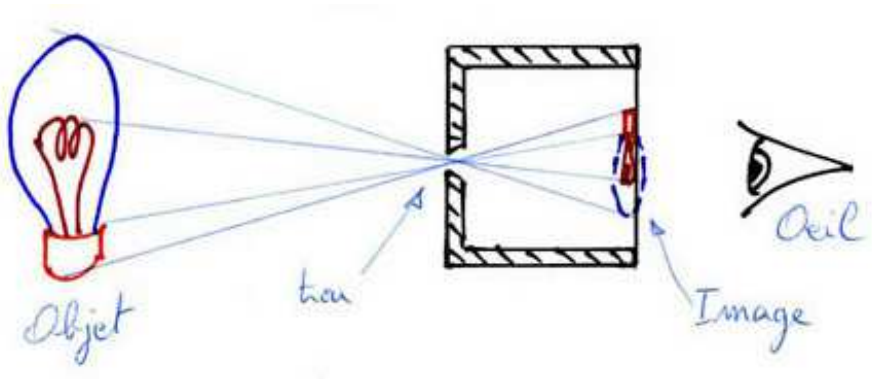

FIG. 1 – Vue en coupe d'une chambre noire

Comment rendre compte de ce que nous observons, comment expliquer la formation de cette image ? Nous dirons à la suite des physiciens que *la lumière se propage en ligne droite*. Une

telle ligne droite est nommée *rayon lumineux*. Les rayons lumineux remplissent tout l'espace, dans toutes les directions. Habituellement, on ne dessine que ceux qui participent directement à la création de l'image (comme dans la figure 1). Mais l'image n'existe que par son *contraste*, c'est-à-dire le rapport d'intensité lumineuse entre les parties claires et les parties sombres. Ce contraste est limité par l'intensité de rayons dits *parasites*, nommés ainsi par leur action d'affaiblissement du contraste. Ce sont les rayons qui viennent éclaircir les zones sombres de l'image. Il faut donc éliminer ces rayons parasites, c'est la fonction de la paroi de la chambre. On peut ainsi considérer (figure 2) que la chambre noire est un appareil à *trier* les rayons lumineux : elle élimine les rayons qu'elle conduit à définir comme parasites.

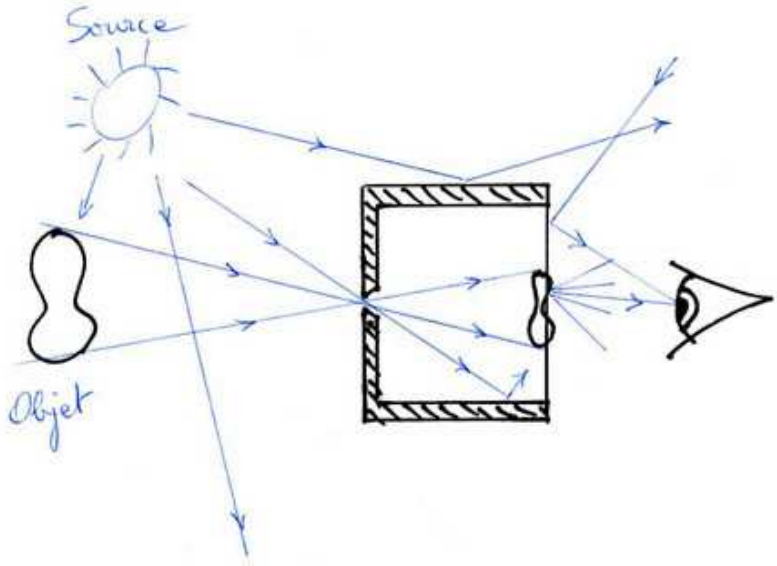

FIG. 2 – Machine à trier les rayons lumineux

Faisons une liste des différents types de rayons lumineux de la figure 2 :

- Rayons ni utiles ni parasites : ce sont ceux qui passent à côté de la boîte et de l'oeil, devant, derrière, au-dessus, au-dessous. Ils ne rentrent ni dans la boîte ni dans l'oeil. Ils n'atteignent pas le calque et ne diminuent pas le contraste. On peut aussi ranger dans cette catégorie ceux qui frappent la paroi de la chambre par l'extérieur, et qui sont soit ré-émis (diffusion), soit absorbés.
- Rayons utiles : ce sont ceux qui proviennent des sources de lumière qui éclairent l'objet, qui donnent ensuite naissance à des rayons qui partent de l'objet. Ceux qui ont la chance de passer par le petit trou continuent en ligne droite jusqu'au calque, et participent à la formation de l'image.
- Rayons parasites, dont nous distinguerons deux types :
  1. ceux qui rentrent par le trou mais ne frappent pas directement le calque. Ils proviennent des objets *hors du champ*. Après une diffusion par la cloison interne, ils peuvent venir frapper le calque dans les parties sombres de l'image et diminuer le

contraste. On les élimine par la pose de peinture noire à l'intérieur de la chambre. Il est aussi très efficace de les éliminer avant leur entrée dans la chambre, par la pose d'un *pare-soleil*, qui est une cloison supplémentaire, extérieure à la chambre.

2. ceux qui frappent le calque par l'extérieur de la chambre (du côté de l'observateur). Ils sont souvent intenses par rapport aux rayons utiles qui sont passés par l'intérieur de la chambre. Ce sont ceux-là qu'on élimine en disposant un voile opaque autour de la tête de l'observateur.

En conclusion, nous pouvons dire que ce qui est *actif* dans cet appareil, c'est la *cloison* de la chambre. Son rôle est de *trier* les rayons. Ce qui est essentiel est cette séparation entre l'intérieur et l'extérieur de la chambre. C'est un travail sur l'espace, la limitation d'un lieu par une frontière.

Pour transformer cette chambre noire en appareil photographique, il suffit d'installer une *surface sensible* ou *capteur* à la place du papier calque. Quel que soit la technologie du capteur (daguéréotype, calotype, argentique, numérique, etc.) il s'agit toujours de transformer l'énergie des photons en énergie électrique. Il faut prévoir une durée d'exposition (que l'on appelle aussi *temps de pose*), temps nécessaire à l'enregistrement d'un certain nombre de photons, afin qu'après le développement (traitement ultérieur sur le capteur) les parties les plus exposées à la lumière apparaissent blanches et les moins exposées apparaissent noires.

Comparons ce dispositif photographique avec le dispositif représenté par Dürer (figure 3), afin de montrer qu'il s'agit bien de la même représentation, appelée *perspective*.

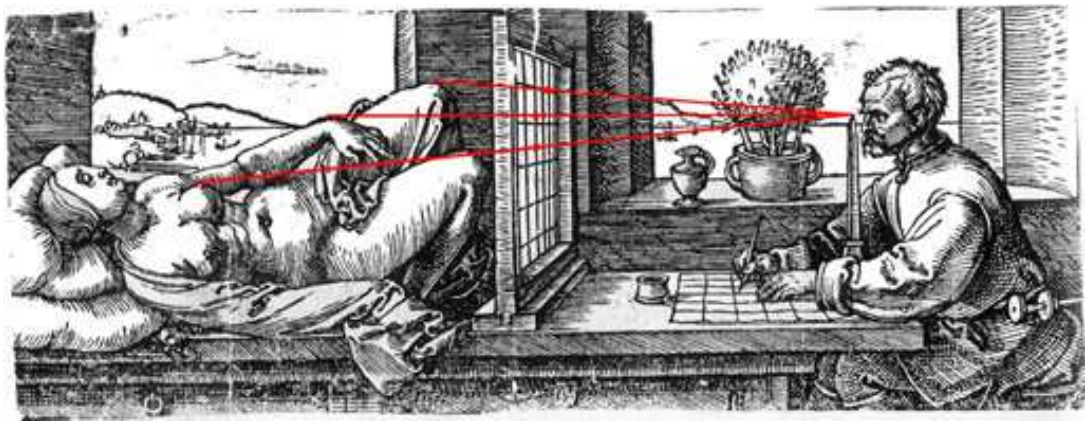

FIG. 3 – Perspective de Dürer

Au milieu de la gravure de Dürer se trouve un cadre transparent quadrillé que nous appellerons le *tableau*. Nous pouvons considérer que c'est dans ce plan que se forme l'*image*. Sur la gravure, l'opérateur reporte des points sur un papier qui est quadrillé de la même façon que le tableau, ce quadrillage ne servant qu'à la précision du report. Nous pouvons simplifier le dispositif de Dürer en remplaçant le tableau quadrillé par une vitre (non quadrillée) et demander à l'opérateur de dessiner directement sur cette vitre-tableau à l'aide d'un feutre (on

nous pardonnera l'anachronisme des techniques). Le travail de l'opérateur consiste à déplacer son oeil afin qu'à chaque position de l'oeil corresponde un alignement entre 3 points : un point de l'objet, un point de l'image, le sommet de l'obélisque. Un tel alignement permet de trouver le point image qui correspond au point objet choisi. La répétition de cette opération permet de dessiner l'image point par point. L'oeil de l'observateur n'intervient pas ici pour *voir* l'objet, d'ailleurs le *point de vue* n'est pas défini par l'oeil mais par le sommet de l'obélisque. L'oeil intervient pour chercher les alignements. C'est donc un tri des rayons, un par un, chaque rayon matérialisant un alignement qui permet de tracer un seul point de l'image. (C'est identique aux algorithmes modernes de *lancer de rayons*.)

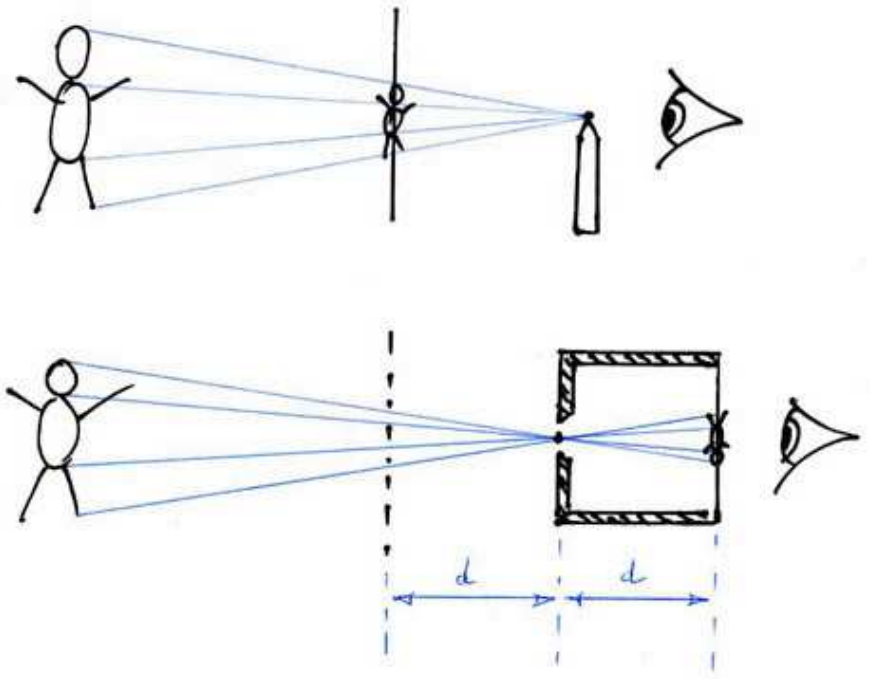

FIG. 4 – Comparaison des deux perspectives

Lorsque nous comparons l'appareil photographique au dispositif de Dürer (modifié par nos soins), nous pouvons repérer deux différences (figure 4) :

1. Le *capteur* de Dürer, qui est ce que nous avons appelé *tableau*, est en avant du point de convergence (le sommet de l'obélisque), alors que pour l'appareil photographique il est en arrière du point de convergence (le trou). Néanmoins, nous pouvons aisément vérifier qu'avec la même distance d entre le point de convergence et le plan image, nous obtenons dans les deux cas des images semblables, elles sont simplement disposées symétriquement par rapport au point de vue (le trou de la chambre noire).
2. Dans le dispositif de Dürer, il y a une participation active de l'homme qui dessine car c'est lui qui trie les rayons, un par un. Il n'y a pas la *cloison* (de la chambre) pour les trier automatiquement. Et il n'y a pas le capteur photo qui enregistre automatiquement.

On peut dire, pour reprendre des termes de l'informatique, que le dessinateur de Dürer trie les rayons successivement, en *séquentiel*, alors que la chambre noire trie les rayons simultanément, en *parallèle*. Vue ainsi, l'*automaticité* de l'appareil photographique serait double, d'une part pour le tri des rayons, d'autre part pour l'enregistrement par le capteur. L'automaticité de la chambre serait au moins aussi importante que l'automaticité du capteur.

L'image obtenue dans la photographie par sténopé est donc identique à celle obtenue par la perspective de Dürer. Lorsque nous remplacerons le trou du sténopé par des lentilles de verre, la géométrie de l'image (nous l'appellerons *perspective*) sera également identique. (C'est ce que l'on appelle le *centre optique* des lentilles qui jouera le rôle du *point de vue*.)

(Cependant, certaines conceptions des lentilles peuvent former des images qui s'écartent de cette perspective. Il est important de ne pas confondre les effets sur la géométrie de l'image qui sont dus à la perspective –perspective définie ici par la gravure de Dürer– et ceux qui sont des particularités de certaines lentilles. Ce point concerne les perspectives avec un grand champ. Certaines personnes considèrent que dans ces perspectives à grand champ, il y a des *déformations* sur les bords de l'image. Ceci apparaît aussi bien sur les perspectives réalisées avec le dispositif de Dürer qu'avec un appareil photographique, à lentilles ou non. Dans le cas de la photographie, il se trouve que la réalisation d'objectifs à grand champ est délicate et que certains concepteurs choisissent de laisser des déformations supplémentaires –dites *en barillet* ou *en coussinet*. Il se trouve par ailleurs que les images des peintres classiques n'utilisent que très rarement des perspectives à grand champ. Il est alors aisé de considérer que toutes les déformations des images à grand champ sont dues aux lentilles, ce qui est abusif.)

Dans les deux dispositifs que nous venons de décrire, le point de vue n'est pas défini par la position de l'oeil, mais il est défini par un objet matériel particulier, sommet de l'obélisque chez Dürer, sténopé pour l'appareil photographique. Par ailleurs, l'image n'est pas mentale, c'est un objet matériel (en optique, on parle d'*image réelle*). L'objet, l'image et le point de vue sont donc *tous les trois des objets matériels*.

À l'aide de ce simple modèle d'appareil photo sténopé, nous pouvons retrouver les explications de (presque) toutes les caractéristiques des appareils photos : perspective, angle de champ, rapport de réduction, ouverture, temps de pose. Passons rapidement ces points en revue.

1.2 Angle de champ, rapport de réduction

Faisons varier la profondeur de la chambre. Considérons, figure 5, deux chambres dont la seule différence est la profondeur, placées à la même distance du même objet. La chambre la plus profonde donne une image plus grande, la chambre la moins profonde donne un champ plus grand.

Quand on change la profondeur de la chambre, on change à la fois la taille de l'image et

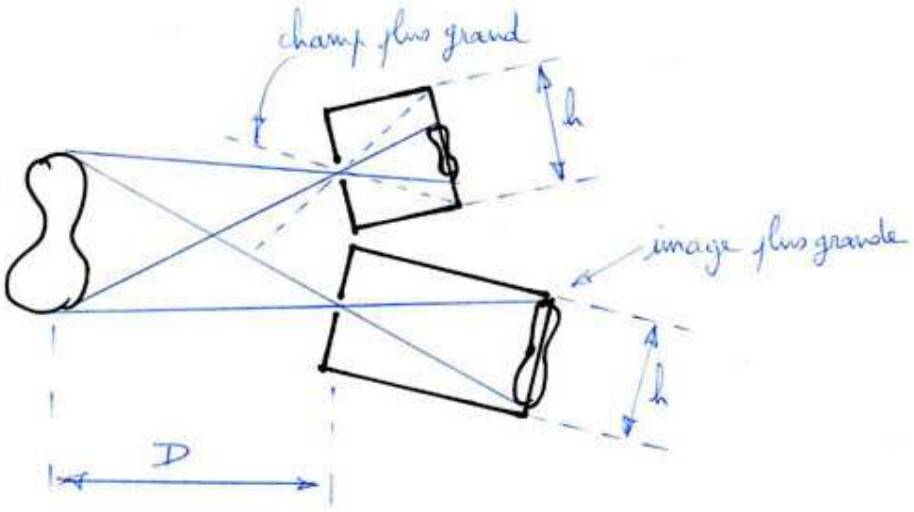

FIG. 5 – Zoom et angle de champ

la largeur du champ (figure 6). Ceci est l'effet connu d'un zoom. Mais il n'y a pas besoin de 12 lentilles de verre pour faire un zoom, c'est un effet direct de la perspective. La raison pour laquelle la conception d'un objectif zoom est délicate, c'est qu'il est très complexe de retrouver cette propriété simple du sténopé dès lors qu'on veut disposer d'un trou de fort diamètre. Mais dans tous les cas, c'est la profondeur de la chambre qui intervient dans la perspective pour définir l'angle de champ et la taille de l'image.

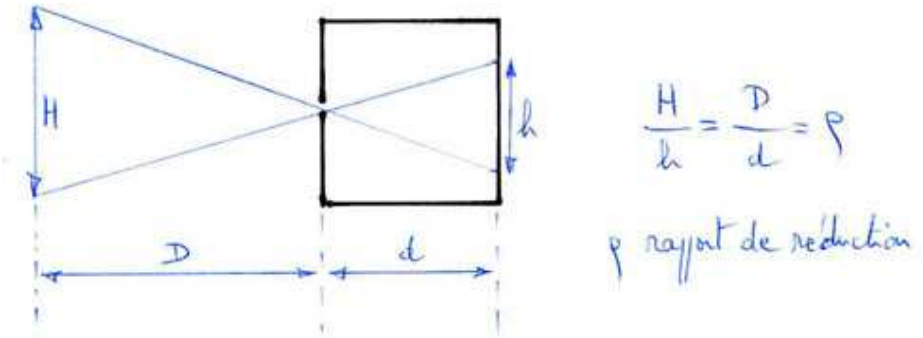

FIG. 6 – Rapport de réduction

Considérons que H et D dépendent de l'objet et du point de vue et ne sont donc pas des caractéristiques de l'appareil (figure 6). La hauteur de l'image h se calcule par $h = \frac{H}{D} \times d$, donc h ne dépend plus que de d. Le paramètre de l'appareil qui influence la taille de l'image est la profondeur de la chambre. La profondeur de la chambre est donc un *étalon* auquel on compare le monde. (Ceci apparaîtra encore plus fortement avec la discussion sur la profondeur de champ.)

Toutes les caractéristiques de l'image : dimensions, cadrage, angle de champ, déformations sur les bords du champ, ne dépendent que des dimensions de la chambre, par l'effet de la perspective. Elles ne sont pas dépendantes de lentilles de verre.

Les fabricants d'objectifs fournissent des exemples de cadrage qui sont exprimés en fonction de la distance focale de l'objectif, tel que dans la figure 7. Mais en toute rigueur, ces cadrages ne dépendent que des *profondeurs de chambre* et non des *distances focales*. Ils sont utilisables pour les sténopés. Or, il se trouve qu'on peut confondre la *distance focale* et la *profondeur de chambre* dans tous les cas qui s'éloignent notablement de la situation de macro-photophotographie. Ainsi, ces exemples de cadrages fournis par les fabricants ne sont pas trop faux. Dans la pratique, les utilisateurs s'en contentent d'autant plus volontiers qu'ils connaissent en général leur distance focale et non leur profondeur de chambre. Mais cette pratique fait oublier que le cadrage ne dépend que de la profondeur de la chambre.

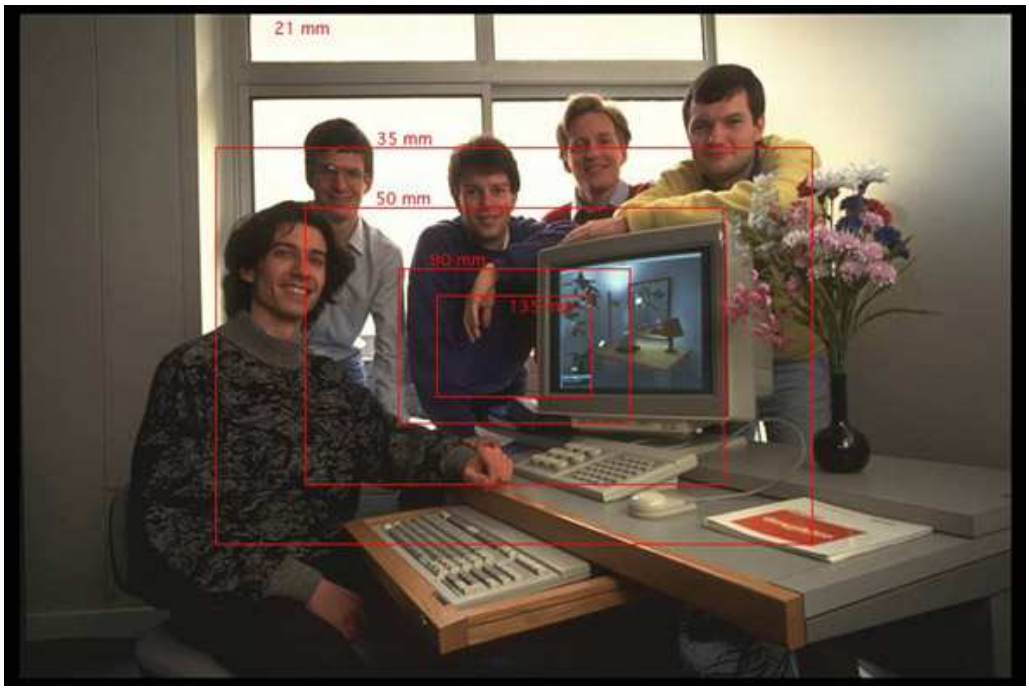

FIG. 7 – Cadrage en fonction de la profondeur de la chambre (capteur 24x36)

L'objectif utilisé pour la photographie de la figure 7 est un objectif grand-angulaire qui ne rajoute pas de déformation à celles de la perspective : toutes les lignes droites de l'espace objet sont rendues droites sur l'image. On peut le constater sur les lignes droites de la fenêtre, de l'écran d'ordinateur et du bureau. Cette image correspond donc à ce que nous pourrions obtenir avec un sténopé ou avec le dispositif de Dürer. Nous pouvons donc en déduire ce qu'il en est de ce que certains appellent *déformations dues la perspective* : par exemple le visage du personnage de droite peut être considéré comme *déformé*. C'est alors une déformation due à la perspective et non à l'objectif. Ce genre de photographie au grand-angulaire n'est vraiment répandu que depuis quelques décennies. Il y a un effet culturel d'habituation à un

type de représentation : ce qui s'écarte de la représentation habituelle est considéré comme *déformé*.

1.3 Ouverture (ou diaphragme) et temps de pose

Soit (figure 8) un trou-sténopé de diamètre δ et d'aire A. Nous avons $A = \pi\frac{\delta^2}{4}$. Soit p la profondeur de la chambre.

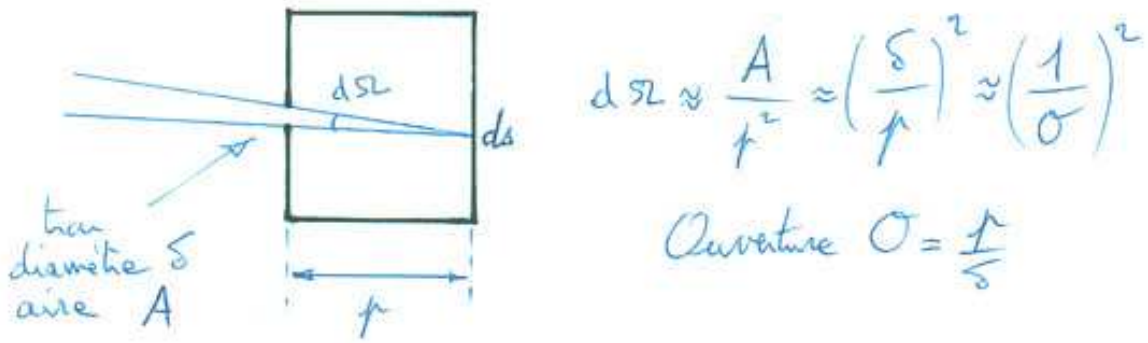

FIG. 8 – Ouverture

La quantité de lumière (en nombre de photons) reçue par un élément ds du capteur est proportionnelle à la durée t et à l'angle solide $d\Omega$. Or l'angle solide varie comme A/p^2, c'est-à-dire comme $(\delta/p)^2$. Si on appelle *ouverture* O le rapport p/δ, alors la quantité de lumière reçue par le capteur est proportionnelle à :

$$t \times (\frac{1}{O})^2$$

Pour un appareil photographique, c'est ce produit qui conditionne la bonne exposition du capteur. La durée t est le *temps de pose* (en secondes), il est habituellement choisi dans une suite de raison 1/2 (figure 9). L'ouverture O est ce qui est gravé à côté du trou (sur l'objectif s'il y a des lentilles) et choisi dans une suite de raison $\sqrt{2}$ (figure 9).

Ainsi, si on progresse d'un cran dans la suite des temps de pose, et d'un cran en sens inverse dans la suite des ouvertures, alors la quantité de lumière reçue est inchangée (ceci est nommé *loi de réciprocité*).

Là aussi, cette notion est indépendante des lentilles de verre et ne dépend que du diamètre du trou et de la profondeur de la chambre.

Ouvertures (rapport profondeur/diamètre) : suite de raison 1,4												
1	1,4	2	2,8	4	5,6	8	11	16	22	32	45	64
Temps de pose (en secondes) : suite de raison 1/2												
4	2	1	1/2	1/4	1/8	1/15	1/30	1/60	1/125	1/250	1/500	1/1000

FIG. 9 – Ouvertures et temps de pose normalisés

1.4 Premier bilan

Sans avoir parlé de lentille de verre, mais uniquement de sténopés, nous avons introduit presque toutes les notions nécessaires à la compréhension de l'appareil-photographique :

– perspective,
– taille de l'image,
– angle de champ,
– temps de pose,
– ouverture.

Il ne manque que l'introduction de :

– distance de mise au point,
– profondeur de champ.

Pour ces deux là, il faut impérativement parler de lentilles de verre, ou plutôt plus généralement de systèmes faisant converger les rayons lumineux.

1.5 Lentilles de verre

Avec un sténopé de petit diamètre, les temps de pose sont en général trop longs. On va donc chercher à augmenter le diamètre du trou, mais l'utilisation de sténopés de fort diamètre conduit à des images trop floues, à moins qu'on trouve un moyen pour faire converger les rayons lumineux au moment de leur franchissement du trou. Détaillons cela (figure 10).

Si on utilise un sténopé, un point A de l'objet (figure 10 en haut) donne une tache A' sur l'image, et non un point. Le diamètre de A' est proportionnel au diamètre du trou. Si on veut augmenter (de façon significative) le diamètre du trou pour obtenir davantage de lumière, on obtiend une image très floue (les taches comme A' et B' se mélangent). Il faudrait courber les rayons lumineux (schéma du bas) pour les faire converger après le trou, au lieu de les laisser continuer à diverger. C'est ce qu'on obtiend avec une lentille de verre ou une combinaison

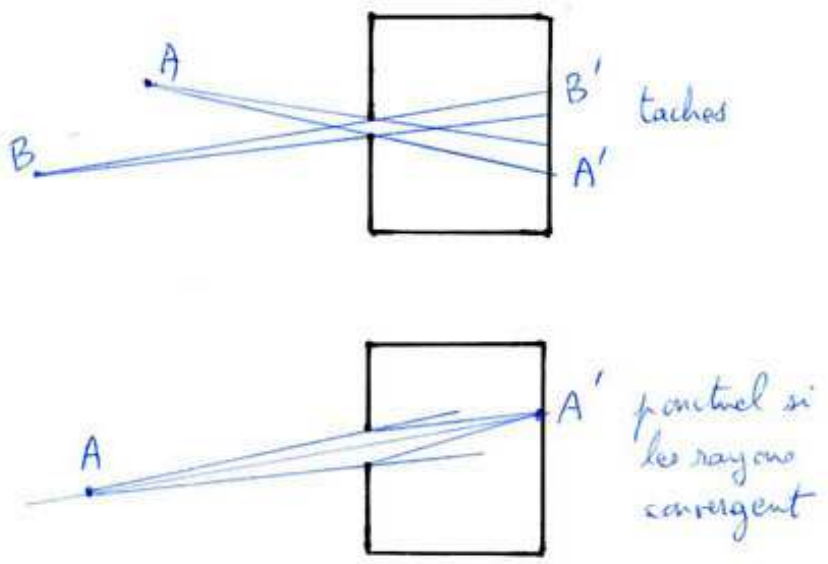

FIG. 10 – Lentille-objectif

de lentilles de verre, que l'on nomme *objectif* en photographie.

Mais ceci amène un phénomène nouveau (figure 11) : Si les rayons convergent en A', ils ne convergent pas en A'' ou A'''. Pour obtenir une image nette, le capteur ne peut pas être situé à n'importe quelle distance du trou, comme c'était le cas avec le sténopé. On dit que A et A' sont des *points conjugués*. Un objet en volume (ayant une épaisseur) comme celui de la figure 11 donne une image en volume à l'intérieur de la chambre. Ce phénomène est très différent de la chambre à sténopé dans laquelle l'image obtenue était la même à toutes les distances du trou (à une homothétie près).

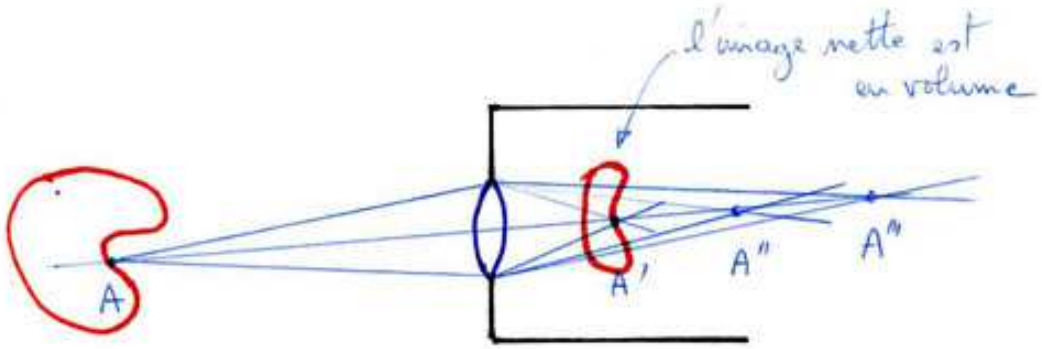

FIG. 11 – Points conjugués et image en volume

Avec un objectif, l'image est localisée à une certaine distance de l'objectif. Comme le capteur est plan, le photographe ne peut pas capter cette image en volume, il en est réduit à ne

pouvoir conserver une image nette que pour un seul plan. Il doit donc choisir la position du capteur, ce qui entraîne un choix de la partie de l'objet qui sera représentée avec netteté (figure 12). C'est la notion de *mise au point* ou *réglage de la distance* à l'objet.

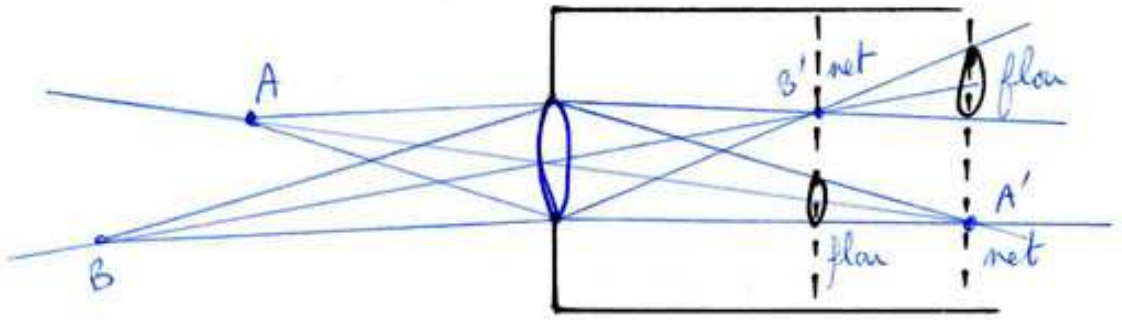

FIG. 12 – Mise au point

Sur la figure 12, nous voyons deux positions possibles du plan du capteur, soit dans le plan de A', soit dans le plan de B', suivant ce que le photographe souhaite voir représenté nettement. Ce réglage s'obtiend en déplaçant le capteur ou l'objectif, car il s'agit simplement de faire varier la profondeur de la chambre. Nous pouvons remarquer que l'introduction de l'*objectif* fait appel à la *subjectivité* du photographe puisqu'il doit faire un choix et indiquer à l'appareil quelle partie de l'objet l'intéresse.

Le point conjugué de l'infini sur l'axe optique (photographie d'un astre du ciel par exemple) est appelé *foyer*. Pour cette raison, un tel système optique, qui fait apparaître des points conjugués, est appelé *système focal*. La distance entre un des foyers et la lentille (supposée d'épaisseur négligeable) est nommée *distance focale*.

Il n'est nul besoin d'étudier de près les lentilles et leur fonctionnement pour établir les formules qui régissent la mise au point. Il suffit de connaître la position des foyers. Tous les cas de construction d'image se déduisent simplement de la position des foyers. En conséquence, tout système focal, quel que soit sa nature, qui assure une convergence de quelque rayons ou particules que ce soit, obéïra aux mêmes lois, représentées par les mêmes formules mathématiques. C'est là un aspect merveilleux de l'optique géométrique.

1.6 Profondeur de champ

Reprenons le schéma précédent, mais avec deux points images rapprochés, situés sur une même ligne passant par le centre optique (figure 13).

Si A' et B' sont suffisamment rapprochés (distance Δp, figure 13) et si le capteur est situé entre les deux, la tache de flou n'est pas assez grande pour être vue comme floue. Situons

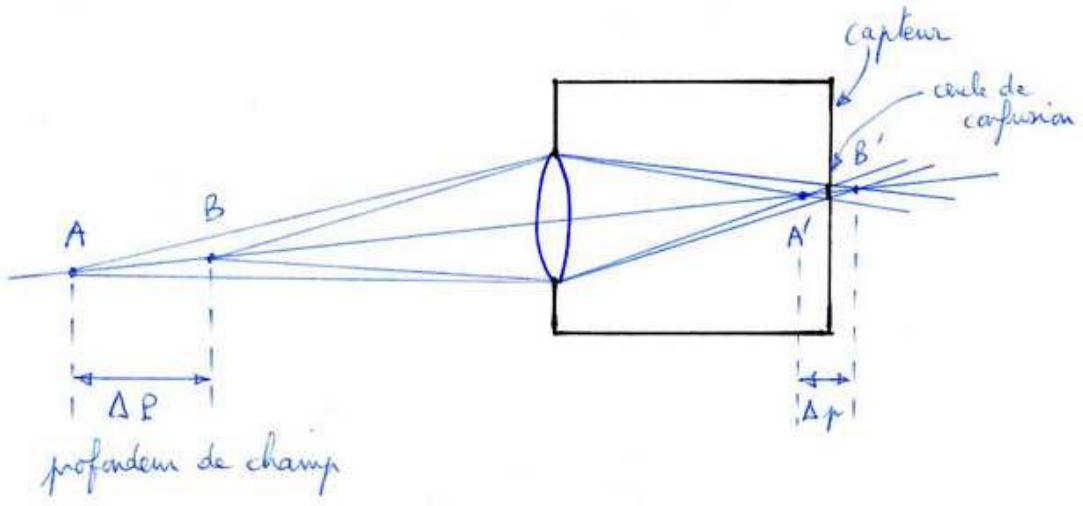

FIG. 13 – Profondeur de champ

nous dans le cas où le diamètre de cette tache est à la limite de ce qui pourrait être perçu comme flou (on appelle alors cette tache *cercle de confusion*). Lorsque nous fixons le diamètre de ce cercle limite, nous imposons une relation entre l'ouverture O et la distance Δp.

Considérons la distance conjuguée de Δp dans l'espace objet. C'est ΔP, distance entre A et B. Nous l'appellerons par définition *profondeur de champ*. Elle ne dépend que du rapport de réduction ρ et de Δp qui, lui, ne dépend plus que de l'ouverture O. Or, pour un objet déterminé, le rapport de réduction ne dépend que de la taille de son image. Ceci nous conduit à un résultat essentiel concernant la profondeur de champ :

À ouverture fixée, **la profondeur de champ ne dépend que de la taille de l'image**.

Ceci est souvent mal compris. On voit en général ces choses-là comme plus complexes, dépendant à la fois de la distance D et de la distance focale f. Mais, une fois que le photographe a choisi l'objet et le point de vue, il ne reste plus qu'un paramètre : le cadrage. Le choix du cadrage impose le rapport de réduction qui, lui, impose la focale. On peut donc dire que la profondeur de champ ne dépend que du rapport de réduction (à objet égal, point de vue égal, cadrage égal, ouverture égale), qui lui, ne dépend que de la taille de l'image. L'ordre dans lequel nous venons d'exposer les contraintes sur les différents paramètres correspond à l'ordre dans lequel le photographe est amené à faire ces choix.

En inversant la proposition précédente, nous pouvons alors être conduits à nous poser la question suivante : *En regardant une photo, peut-on en déduire le format de l'image originale ?* (Non la taille de l'image finale, mais la taille du capteur.) En effet, quand on regarde une photo, on a une idée approximative de la profondur de champ. Pouvons nous en déduire la taille de la photo originale ? Et bien, il se trouve que dans beaucoup de cas la réponse est *oui*. C'est assez surprenant, mais nous allons le montrer ci-dessous sur des exemples.

Considérons une première situation concrète : la photographie d'une personne debout, plein cadre. Pour fixer les calculs (dont les résultats sont consignés dans le tableau de la figure 14), considérons qu'il s'agit d'un objet de 2 mètres, photographié à la distance de 3 mètres. (Nous avons utilisé les formules classiques de profondeur de champ, avec un cercle de confusion d'un diamètre de 30 microns.)

Personnage en pied (hauteur 2 m), photographié à la distance de 3 mètres				
Type d'appareil	**Taille de l'image**	**Rapport de réduction**	**Profondeur de champ à l'ouverture 2,8**	**Profondeur de champ à l'ouverture 22**
Chambre grand-format	20 cm	10	2 cm	15 cm
Moyen-format	6 cm	30	20 cm	1,5 m
24x36	3 cm	60	75 cm	40 m
Compact numérique	2 cm	100	1,80 m	infinie

FIG. 14 – Photo d'un personnage en pied avec diverses chambres

On peut constater sur ce tableau que les situations de profondeur de champ sont extrêmement différentes quand on passe d'un format de chambre à un autre. Même en variant l'ouverture énormément (de 2,8 à 22), on arrive difficilement à rendre ces situations comparables. La faible profondeur de champ de la chambre grand-format (même à ouverture 22) ne peut être obtenue en moyen-format qu'avec un objectif de très fort diamètre (ouverture 2) qui est encore une pièce rare. À l'opposé, l'arrière-plan du compact numérique sera toujours net.

On pourra donc effectivement deviner dans ce cas le format original du capteur. Pour vérifier nos calculs, nous avons commencé par chercher une photo ancienne d'un personnage debout avec une très faible profondeur de champ. Nous nous sommes arrêté sur une photo de August Sander : *Catéchumène, 1911* ; qui représente une jeune fille debout, dont l'image du corps entier s'étend sur toute la hauteur de l'image, à côté d'un champ de blé. De très rares épis de blé sont nets, la profondeur de champ est réduite à quelques centimètres, il s'agit donc probablement d'une photographie à la chambre grand format.

Nous avons cherché des situations comparables, mais avec des formats de capteurs plus petits. Nous avons réalisé des photographies avec un appareil 24x36 argentique, ainsi qu'avec un compact numérique. Ces essais ont confirmé les valeurs de profondeur de champ du tableau de la figure 14.

Considérons un deuxième exemple, la photographie d'un bâtiment d'une hauteur de 20 mètres, photographié à la distance de 30 mètres (tableau de la figure 15).

Dans ce cas, les quatre situations sont assez semblables, sauf éventuellement avec la chambre grand-format où il peut être nécessaire de faire attention aux lointains. Pour ce cas, en général on ne pourra pas deviner la taille de la chambre en regardant la photographie. Il en

Immeuble de 6 étages (hauteur 20 m), photographié à la distance de 30 mètres				
Type d'appareil	**Taille de l'image**	**Rapport de réduction**	**Profondeur de champ à l'ouverture 2,8**	**Profondeur de champ à l'ouverture 22**
Chambre grand-format	20 cm	100	4 m	50 m
Moyen-format	6 cm	300	20 m	infinie
24x36	3 cm	600	infinie	infinie
Compact numérique	2 cm	1000	infinie	infinie

Fig. 15 – Photo d'un bâtiment avec diverses chambres

sera de même dans tous les cas où la profondeur de champ est très grande, c'est-à-dire pour les très grands rapports de réduction, c'est-à-dire pour les très grands objets (objets grands devant la taille de toutes les chambres imaginables !).

Considérons à l'opposé un troisième exemple, celui de la photographie d'un visage cadré serré (tableau de la figure 16).

Visage cadré serré (hauteur 20 cm), photographié à la distance de 40 centimètres				
Type d'appareil	**Taille de l'image**	**Rapport de réduction**	**Profondeur de champ à l'ouverture 2,8**	**Profondeur de champ à l'ouverture 22**
Chambre grand-format	20 cm	1	De l'ordre du dixième de millimètre situation de macro-photo	
Moyen-format	6 cm	3	1,5 mm	1,2 cm
24x36	3 cm	6	6 mm	5 cm
Compact numérique	2 cm	10	2 cm	20 cm

Fig. 16 – Photo d'un visage cadré serré avec diverses chambres

Ici, les différentes chambres conduisent à des situations extrêmement différentes. Avec la chambre grand-format, le visage sera peut-être méconnaissable, car nous sommes en situation de macro-photographie. À l'opposé, avec le compact numérique, il est possible que la tête soit entièrement nette, ce que nous avons vérifié par l'expérience.

Pour les formats intermédiaires, les résultats sont également intermédiaires et très différents. En utilisant une ouverture moyenne au 24x36 (appareil compact), nous obtenons une profondeur de champ de 2 à 3 centimètres, le visage est très bien reconnaissable, mais seuls quelques rares parties du visage sont nettes.

Munis de ces exemples, plaçons nous maintenant dans la situation inverse, situation de celui qui regarde une image photographique et qui essaye de deviner avec quelle chambre cette photo a été réalisée.

Nous avons choisi une photographie faite par Gilles Caron au Biafra en 1968 représentant

au premier plan net le visage d'une jeune femme portant des obus sur la tête. La hauteur du visage couvre la moitié de la hauteur de l'image. En arrière plan, peut-être deux mètres en arrière, se trouve un homme qui est flou mais distingable. La profondeur de champ semble de l'ordre de 50 centimètres ou un peu plus. C'est un rapport de réduction un peu plus fort que le visage cadré serré. Sans refaire les calculs, on peut parier rapidement qu'il s'agit de 24x36. Certes, on connait les pratiques des reporters de cette période. Mais on peut se convaincre rapidement qu'avec un format plus petit (compact numérique), le personnage au second plan serait net. Avec une chambre moyen ou grand-format, le personnage en arrière-plan ne serait pas du tout visible.

En conclusion, nous avons vu que dans tous les cas ou l'objet n'est pas trop grand devant la taille de la chambre, il est possible de deviner la taille de la chambre en regardant la photographie, car la variation d'ouverture ne permet généralement pas de rattraper les effets de profondeur de champ dus à la taille de la chambre.

Comme il est reconnu que la profondeur de champ est un paramètre important parmi les possibilités d'expression du photographe, on doit admettre que cela l'amène à changer de chambre en fonction de ce qu'il veut montrer. La taille de la chambre est le principal *degré de liberté* du photographe.

En photographie numérique, on dispose plutôt de petits formats de capteur. Sinon, c'est très cher et/ou très contraignant. On a donc en général de très grandes profondeurs de champ comparativement aux chambres plus grandes accessibles en argentique. (Mais cela est amené à changer dans un avenir proche.)

1.7 Conclusion de cette première partie

Nous avons passé en revue les différents paramètres de prise de vue d'un appareil photographique, et nous avons retrouvé toute l'optique photographique en faisant très peu de calculs, en utilisant simplement quelques résultats de géométrie élémentaire. Nous avons montré ainsi que tout ce qui concerne la formation de l'image (la perspective), et son enregistrement sur un capteur, peut être déduit de la proposition *la lumière se propage en ligne droite*. Nous utiliserons cette remarque comme point de départ pour le deuxième exposé.

De tous les paramètres de prise de vue d'un appareil photographique, seules la *distance de mise au point* et la *profondeur de champ* sont étroitement liées à l'utilisation d'un système focal (objectif avec lentilles de verre). Et encore, il n'est nullement nécessaire de préciser la nature des lentilles (ni même l'existence de lentilles), il suffit de signaler l'existence de *couples de points conjugués*, ce qui est requis par la volonté d'obtenir des images nettes avec des trous plus grands que des trous d'aiguille.

Notre façon d'exposer cette *optique* a mis en évidence le rôle essentiel joué par la cloison de la chambre noire et ses dimensions : 1) cette cloison trie les rayons et forme ainsi l'image

de manière automatique ; 2) la profondeur de la chambre définit la taille de l'image et se comporte donc comme une unité de mesure du monde ; 3) la largeur du capteur détermine la profondeur de champ pour un système focal. À coté de ces trois fonctions essentielles de la *boîte*, les rôles de l'objectif et du capteur paraissent bien secondaires.

Notre démarche s'originait d'une interrogation sur l'apport des capteurs numériques, en relation avec un questionnement sur le *virtuel*, caractère attribué au monde des images numériques. Notre exposé nous conduit à dire que la nature du capteur est de peu d'importance par rapport à la fonction de la boîte, la *camera obscura*. La seule remarque que nous ayons faite à propos de l'apparition des capteurs numériques concerne le fait que ces capteurs sont généralement petits et conduisent à de grandes profondeurs de champ.

Il est probable que dans un avenir proche, les structures des appareils photographiques seront complètement transformées car les capteurs embarqueront des calculs de traitement d'image. La conception des objectifs en sera probablement également transformée. Ils ne serviront peut-être plus à former une image suivant les lois de l'optique géométrique. Dans ce cadre, notre argumentation précédente ne tiendra plus car elle repose sur l'hypothèse que les appareils photographiques sont construit suivant le schéma classique de la camera obscura, en vigueur depuis la Renaissance. Il est probable que les conséquences seront importantes sur les représentations utilisées par les hommes, et donc sur les sociétés humaines. Mais ceci est plutôt à relier à l'exposé suivant.

De ce premier exposé, nous pouvons déduire que, pour l'instant, nous n'avons pas rencontré le *virtuel* dans cette exploration des appareils photographiques numériques, ou en tous cas nous n'avons pas trouvé quelle signification donnée à ce mot pourrait être reliée à ces nouveaux capteurs. Cherchons alors le virtuel autrement : par la voie d'une interrogation de la notion de *représentation*, dans son rapport avec la *vision*.

2 Qu'est-ce que *voir* ?

Dans ce deuxième exposé, nous allons saisir l'opportunité d'un regard critique sur le premier exposé. Nous avons mis en évidence la trame du discours de l'opticien, nous pouvons nous demander ce que ce discours nous apprend sur le réel. Nous verrons que cela nous conduira à une formulation de ce qu'est *voir*, et nous pourrons la mettre en parallèle avec ce qu'est *mesurer* pour l'expérimentateur, et ce qu'est *simuler* pour l'informaticien qui produit des images de synthèse. Nous serons ainsi conduit à approcher une notion de *virtuel* qui pourrait être celle auquel on semble faire allusion dans le contexte des images numériques.

Dans l'exposé précédent, deux points nous semblent en particulier soulever des questions :

1. Tous les raisonnements de l'exposé précédent s'appuient sur la proposition : *la lumière se propage en ligne droite*. Quel est le statut logique de cette proposition ? S'agit-il

d'une découverte du physicien qui a observé la nature de la lumière, ou bien s'agit-il au contraire d'un principe qui permet de construire l'espace et les objets ? On ne peut accepter de considérer qu'il s'agit d'une vérité (sur la nature), qui serait indépendante de la construction du discours des hommes. Le rôle de cette proposition dans le discours est un point à éclaircir.

2. Dans toutes les figures de l'exposé précédent, nous avons dessiné un *oeil*. Il s'agit d'une représentation d'un *sujet* de la perspective. Dans les figures qui représentent la chambre avec un calque, l'oeil est dessiné derrière le calque, cela nous dit pour qui l'image prend un sens. Dans la gravure de Dürer, nous avons vu que le dessinateur prend une part active au tri des rayons, il déplace son oeil pour trouver les alignements, ce sujet montre ainsi de façon encore plus évidente son intention. Dans les figures qui ont été faites ensuite, l'oeil devient implicite car le capteur photographique est opaque, mais il y a toujours le sujet qui met en place l'expérience et qui ensuite regarde la photographie.

   Mais on oublie en général qu'il y a un deuxième sujet, et qui n'est pas dans la même posture, il s'agit de celui (de ceux) qui regarde(nt) ces schémas : le physicien qui énonce le cours de physique et ses élèves. Ce deuxième sujet se place en dehors du plan du schéma et regarde comment fonctionne la perspective pour le premier sujet.

   Ces deux sujets peuvent-ils être confondus (ou tout du moins leurs rôles, leurs fonctions) ? Pour le physicien, il est important qu'il n'y ait pas de distinction entre les conceptions (visions du monde ?) de ces deux sujets, car il est posé en principe que les lois de la physique sont universelles et objectives. Dans ce contexte, ces lois doivent s'appliquer aussi bien au premier sujet, qui est transformé pour l'occasion en *objet* dans l'énoncé du second sujet. Du coup, elles doivent s'appliquer aussi au deuxième sujet, qui ne doit pas pouvoir être distingué du premier.

   On remarquera que cette attitude du physicien est celle qui est implicitement adoptée par Dürer puisque son schéma de construction de la perspective est lui-même dessiné en perspective. Il suppose donc au sujet qui énonce le cours de perspective la même façon de voir que celle du sujet qu'il dessine comme dessinateur.

   Si on adopte cette attitude, lorsque le deuxième sujet regarde la représentation du premier en train de voir, il pose que sa propre vision est identique, et donc *il se voit en train de voir*.

On pourrait remarquer que le fait de se poser la question du point 1. est lié à la question du deuxième point. En effet, on peut considérer que l'énoncé sur la propagation de la lumière est un énoncé du premier sujet, et que la question du statut logique de cet énoncé est une question du deuxième sujet.

2.1 La réalité dépend du langage

La lumière se propage en ligne droite. Quel est le statut logique de cette proposition ?

– Si on sait déjà ce qu'est une ligne droite, cela nous informe sur une propriété de la lumière.

Mais est-ce :

α) une *définition de la lumière* ?

β) une connaissance *acquise par l'observation de la lumière* ?

γ) une *propriété démontrée* à partir d'une autre définition de la lumière ?

– Si on ne connait pas la ligne droite,

δ) on peut utiliser la propagation de la lumière *pour définir la ligne droite.*

Cela nous donne accès à quatre statuts logiques différents pour cette proposition. Nous ne prétendons pas qu'il n'y ait que ces quatre significations, on peut probablement en trouver d'autres.

Donnons des exemples pour illustrer ce propos. Le menuisier, pour vérifier la rectitude de son tasseau, le regarde *en bout* pour voir si l'arête se voit comme un point. Il utilise donc la lumière comme définition de la ligne droite. Un jardinier plante des piquets. Il veut que ses piquets soient alignés (ligne droite), alors il se place en bout et regarde. *Je veux ne voir qu'une tête.* Si les piquets se cachent les uns derrière les autres, alors ils sont alignés. Ici encore, il s'agit d'utiliser la lumière comme définition de la ligne droite. C'est une méthode très largement utilisée dans la pratique. Pour la construction de bâtiments et les travaux de terrassement, on utilise des lunettes de visée ou des faisceaux laser. Il s'agit toujours d'utiliser la lumière pour réaliser une ligne droite.

Dans tous ces cas, la proposition ne peut rien nous apprendre sur la propagation de la lumière.

Mais plaçons-nous par hypothèse dans la situation où on aurait pour la ligne droite une définition variable suivant le monde des sujets. On pourrait se trouver dans la configuration suivante (figure 17) qui représente un monde plan (le plan de la figure) alors que nous nous plaçons en dehors de ce monde plan (avec des lois différentes).

L'oeil dessiné verrait que tous les piquets se cachent derrière le premier (propagation de la lumière), or nous avons dessiné des rayons courbes. Il se pourrait qu'aucun sujet du monde du plan ne se doute que la lumière ne se propage pas en ligne droite, connaissance que nous aurions nous, nous qui ne sommes pas du même monde.

Dans cette configuration, si la lumière est utilisée comme définition de la ligne droite par les habitants du plan du dessin, aucun observateur de leur monde ne serait dans la situation où nous sommes, de pouvoir sortir de leurs conventions pour dire : *ces gens croient que la lumière se propage en ligne droite.*

C'est une autre version de la caverne de Platon [4], et c'est un moyen d'introduire une question metaphysique. Si nous pouvons considérer que certains sujets ont moins de connaissance que nous sur la réalité, alors on peut se demander si notre propre connaissance n'est pas limitée. Mais Platon l'utilise, non pas pour mettre en cause ce qui est vu par les *êtres*

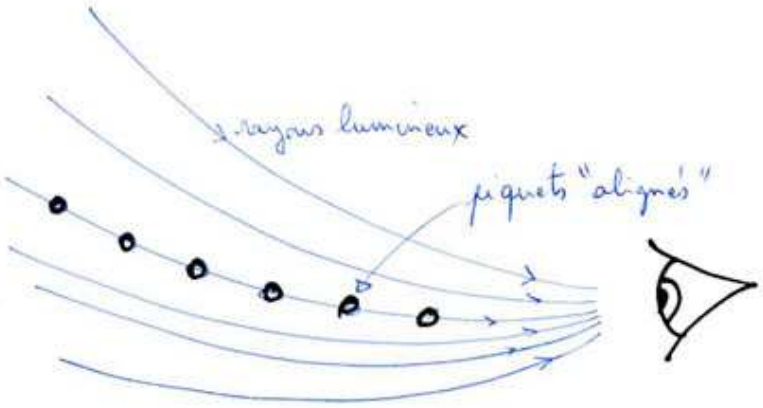

FIG. 17 – Situation de caverne platonicienne

intelligents (ceux qui sortent du plan du dessin), mais au contraire pour dire que les *esclaves* (ceux qui restent dans le plan du dessin) ne voient que les *apparences* alors que les *êtres intelligents* accèdent à *l'essence* des choses.

Renonçons à accéder à l'essence des choses. Par contre, considérons que les apparences des choses changent suivant le langage logique utilisé pour bâtir des expériences sur ces choses. Ce que nous pouvons apprendre du monde extérieur en faisant des expériences de physique dépend de la structure logique du discours. Donnons un exemple pour illustrer ce point.

Nous connaissons une autre méthode pratique pour aligner des piquets : le cordeau. On tend un fil, et on dit qu'il réalise une ligne droite. C'est une deuxième définition pour la ligne droite qui consiste à dire : *tendre, c'est trouver le plus court chemin, et c'est une définition de la ligne droite*. Dans le plan précédent, le fil tendu serait-il vu droit par ses habitants ? (figure 18).

Dans cette figure, il y a deux possibilités pour chacun des deux cas représentés :

1. Si *on définit la ligne droite par la lumière*, alors, dans la situation du haut, les piquets et le cordeau sont droits. Cela ne nous apprend rien sur la lumière. Dans la situation du bas, les piquets sont alignés, mais le cordeau n'est pas droit (car il n'est pas comme les rayons lumineux). Cet écart entre le cordeau et les piquets nous apprend quelque chose sur le cordeau (nous apprenons que le plus court chemin n'est pas la ligne droite).
2. Si *on définit la ligne droite par le cordeau*, alors dans la situation du haut, la lumière et les piquets sont droits (car ils sont comme le cordeau) et on apprend que la lumière se propage en ligne droite (ce qui est alors une connaissance acquise par l'expérience). Dans la situation du bas, ni la lumière ni les piquets ne sont droits (car ils ne sont pas comme le cordeau), et on apprend là aussi quelquechose sur la lumière (on apprend qu'elle ne se propage pas en ligne droite).

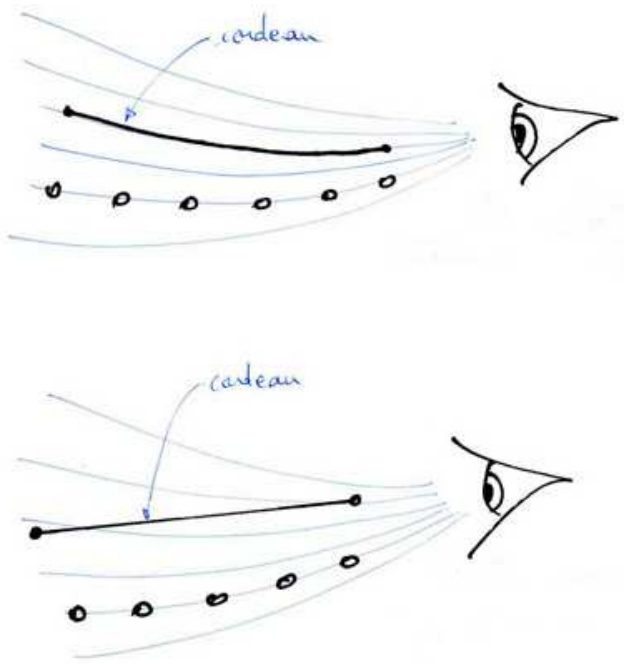

FIG. 18 – Le cordeau est-il comme les rayons lumineux ?

En conclusion, le fait qu'on puisse ou non apprendre quelque chose du monde extérieur dans une expérience de physique, ainsi que ce qu'on peut y apprendre, dépend du système logique dans lequel on se place. Cela dépend, non seulement des règles de déduction (c'est-à-dire de la mécanique du langage), mais aussi des choix des postulats et des définitions, c'est-à-dire plus généralement du langage logique. En d'autres termes, la réalité (tout du moins ce qu'on en connaît et ce que l'on peut en dire) dépend du langage.

Ce que disent les physiciens (ou plutôt ce qu'ils disaient avant la relativité d'Einstein [5]), c'est que, dans l'espace 3D euclidien où nous vivons, la lumière se propage suivant le même chemin que le fil tendu. *Le plus court chemin* n'a de sens que dans un espace où il existe une notion de distance indépendante de l'observateur. Les mathématiciens disent que ce n'est pas vrai de tous les espaces, mais que c'est vrai dans les espaces euclidiens. Par ailleurs, le fait que le trajet de la lumière soit le plus court chemin est connu en physique sous le nom de *principe de Fermat* (si l'on entend *plus court* dans le temps), qui est une façon possible de fonder l'optique.

Mais tout cela, ce ne sont pas des choses qui sont données, qui nous tombent dessus, envoyées par une Nature qui pré-existe au langage. Il a fallu inventer tous ces concepts de *ligne droite*, *lumière*, *plus court chemin*, *euclidien*, etc... et il a fallu trouver un discours cohérent pour relier ces concepts.

2.2 Les sens sont des perceptions *de contact*

Nous avons vu que notre connaissance du monde extérieur dépend du langage. Elle dépend aussi de nos perceptions, de ce que nous pouvons faire avec nos sens. De ces possibilités découleront des contraintes qui conditionneront les expériences imaginables par le physicien et leurs interprétations. Un point essentiel réside dans le fait suivant :

La vue est une perception de contact : l'oeil ne perçoit pas à distance.

Ce n'est pas propre à la vue, c'est le cas de tous les sens : toucher, goût, odorat, ouïe, vue. Ce sont tous des sens *de contact*, c'est-à-dire qu'ils ne s'exercent pas *à distance*. Afin de bien nous en persuader, prenons-les un par un :

- Le toucher est, bien entendu, un sens de contact. Il faut un contact entre l'objet et la peau pour percevoir par le toucher. C'est une perception à la surface de notre corps.
- Le goût est aussi un sens de contact, localisé sur la langue, donc plus intime puisque un peu intérieur, au contact de muqueuses. Mais si on dit que ces muqueuses sont une partie de la frontière entre notre corps et le monde extérieur, alors la situation est semblable à celle du toucher.
- Pour l'odorat, c'est un peu plus compliqué car on peut avoir l'impression de *sentir à distance*, par exemple l'odeur d'une fleur située à un mètre devant nous. Or, les physiologistes nous disent que des molécules de vapeur du parfum sont venues se dissoudre à la surface de notre muqueuse nasale. Il s'agit là encore d'un contact intime à la frontière de notre corps. Il y a eu *propagation de matière* dans l'air. C'est une partie de la matière de la fleur qui est venue jusqu'à nos muqueuses. Cette notion de *propagation* n'est pas évidente, elle a été *construite*, à partir des notions d'espace et de temps. Elle est compatible avec l'idée que notre corps occupe un lieu de l'espace, qu'il est limité par une frontière, et qu'il a un extérieur. Dans cet espace extérieur, il peut y avoir propagation, c'est-à-dire changement de lieu qui prend du temps.
- Pour l'ouïe, c'est un peu la même chose, mais plus troublant encore car on a aussi l'impression d'entendre à distance, à une distance encore plus grande, et la propagation est plus rapide. Des expériences nous montrent que le son ne se propage pas sans l'air, qu'il est une perturbation de la pression de l'air, perturbation qui se propage. C'est une propagation, non de *matière* comme pour l'odorat, mais de *perturbation de pression*. L'oreille ne perçoit que les variations de pression localisées sur le tympan, et non à distance. Cela permet de la tromper si nous portons des *écouteurs* qui créent une *illusion sonore*. Ces expériences d'illusions prouvent que l'ouïe est aussi une perception de contact, à la frontière de notre corps.
- Pour la vue, on ne perçoit que les rayons lumineux qui entrent dans notre oeil, et non ceux qui passent devant sans le rencontrer. L'oeil ne peut percevoir non plus comment se propagent les rayons lumineux avant qu'ils n'atteignent notre oeil, il ne peut donc savoir s'ils se propagent en ligne droite. Ce n'est ni une propagation de matière (comme pour l'odeur), ni une propagation de déformation d'un milieu (comme pour le son), puisque la lumière se propage aussi dans le vide. Ce que l'oeil perçoit, c'est la *direction* des rayons

lumineux entrants. Le couple (cristallin, rétine) permet une discrimination de direction (locale, en le lieu de l'oeil) des rayons. Cette conception est compatible avec les expériences d'*illusion optique*, analogues des illusions sonores obtenues avec les écouteurs.

Afin d'illustrer le fonctionnement des illusions d'optique, prenons l'exemple du miroir : (figure 19)

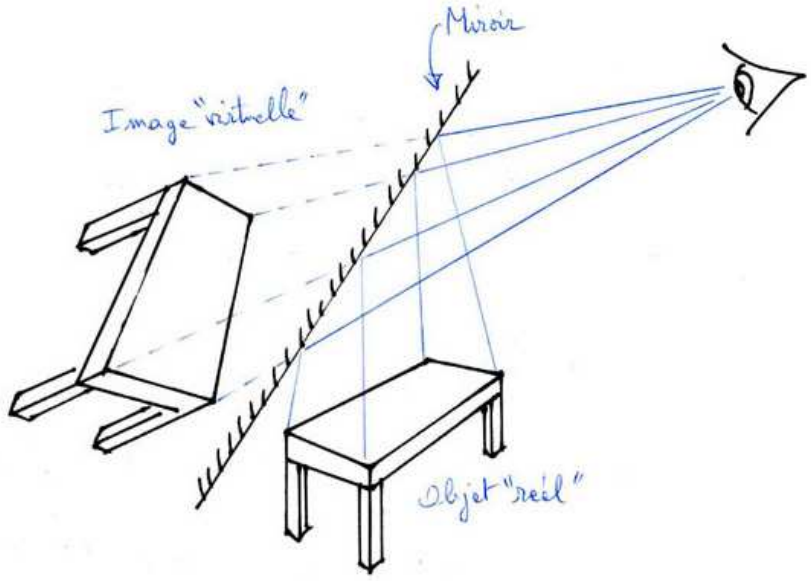

FIG. 19 – Le miroir nous montre que l'oeil ne perçoit pas à distance

Si l'observateur *voit la table virtuelle derrière le miroir*, c'est bien qu'il ne perçoit pas à distance, sinon il percevrait qu'il n'y a pas de table à cet endroit. Si l'oeil percevait à distance, on verrait à travers le miroir, et le miroir n'aurait aucun effet sur nous, ce ne serait pas un miroir. Aucune expérience d'illusion optique ne fonctionnerait. Il n'y aurait pas non plus de corps opaque.

Si nous voulons conserver la consistance de l'ensemble des connaissances que les physiciens rassemblent sous le nom d'optique, il est essentiel de conserver la notion de *propagation de la lumière*. Cela conduit à considérer que l'oeil ne perçoit que la direction des rayons lumineux entrants, et qu'il ne peut percevoir à distance. L'oeil ne peut donc pas percevoir l'espace et les objets distants. *Ce n'est donc pas l'oeil qui peut voir*, ou en tous cas ce n'est pas *l'oeil seul* qui peut voir, si on appelle *voir* ce qui consiste en : construire une connaissance visuelle de l'espace et des objets.

On a donc mis là au jour une confusion de langage dans laquelle nous sommes tous pris : il nous faudrait deux verbes différents pour nommer d'une part l'action de l'oeil, *ce que fait l'oeil*, sa fonction, et d'autre part l'action de construire l'espace et les objets, l'*action de connaître ce dans quoi se trouvent les objets* et notre corps.

Pour la suite de cet exposé, nous ferons le choix d'utiliser le mot *perception* pour désigner ce qui est *de contact*, c'est-à-dire le phénomène local à la surface du corps, c'est-à-dire ce que fait l'oeil (entre autres organes de perception).

Et nous utiliserons les mots *vision, vue, voir* pour désigner la *construction de la connaissance (visuelle) de l'espace et des objets.*

Avec ces définitions, la vue ne sera pas confondue avec une perception. L'oeil ne percevra pas à distance, mais l'homme verra à distance. L'oeil, étant lié uniquement à la perception, ne sera donc pas seul l'organe de la vue.

2.3 Comment voyons nous à distance ?

Notre oeil ne perçoit que la direction locale des rayons lumineux, leur direction au moment où ils entrent dans notre oeil, et non leur direction à quelque distance de là. Si ces rayons ne sont pas des lignes droites, peut-être sommes-nous toujours dans une situation de mirage (figure 20), situation voisine de celle du miroir.

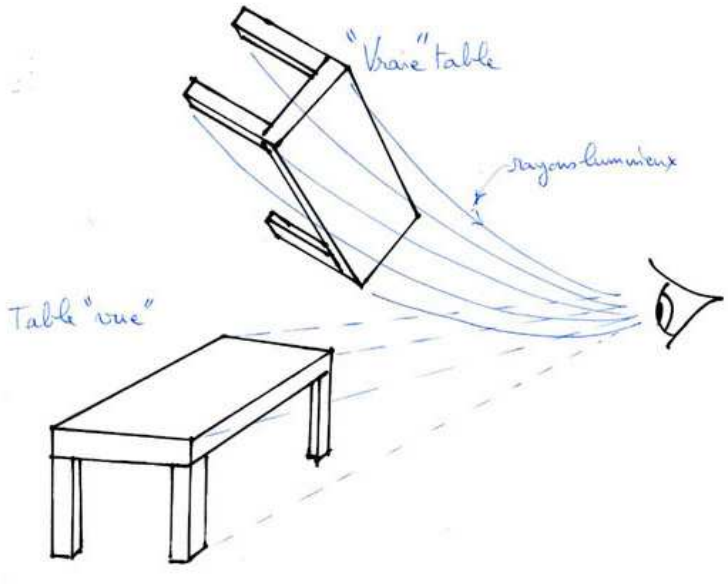

FIG. 20 – Comment extrapoler l'espace à partir de nos perceptions ?

La table que je crois voir devant moi pourrait être à situer dans une autre direction. Comment peut-on savoir si la lumière se propage en ligne droite ? On ne peut pas voir la lumière se propager ! En tous cas, on ne peut pas le voir avec notre oeil, puisque ce que perçoit l'oeil est un rayon qui ne se propage plus, l'oeil l'a absorbé. Pour observer comment la lumière se propage, il faudrait observer le même rayon lumineux à plusieurs endroits de son parcours, ce qui est impossible puisqu'un rayon lumineux observé est un rayon lumineux absorbé.

On en est donc réduit à obtenir cette connaissance de façon indirecte, par exemple par les expériences d'optique. Ah oui ? Mais si l'optique géométrique est construite en supposant que la lumière se propage en ligne droite, alors nous sommes pris dans une boucle.

Comment faire ? Il faut utiliser une autre posture logique. De toutes façons, nous devons *construire* le monde extérieur à partir de nos perceptions de contact. Donc *nous devons "extrapoler" le monde extérieur à partir de nos perceptions.*

Une attitude possible consiste à *postuler* que la lumière se propage en ligne droite (cela suppose que nous ayons une autre définition de la ligne droite : par exemple espace euclidien et plus court chemin). La direction d'arrivée d'un rayon dans notre oeil nous donne alors une information sur la direction de l'espace dans laquelle se trouve l'objet : l'objet est *quelquepart sur la droite qui part de notre oeil dans cette direction* (figure 21). Ce que nous avons à faire est donc l'*inverse de la perspective* : en considérant les rayons qui arrivent dans notre oeil, retrouver d'où ils peuvent venir. Ceci ne nous indique rien sur la profondeur (la distance à l'objet). Or il est d'expérience commune que *plus c'est loin, plus c'est petit* (petit en terme de diamètre angulaire). Ceci est cohérent avec le fait qu'un objet de même taille sera vu sous un angle plus petit s'il est plus loin. Cette expérience nous donne donc confiance en notre postulat. Par ailleurs, toutes les expériences d'optique viennent conforter la cohérence de ce discours, non pas la véracité, mais la cohérence logique.

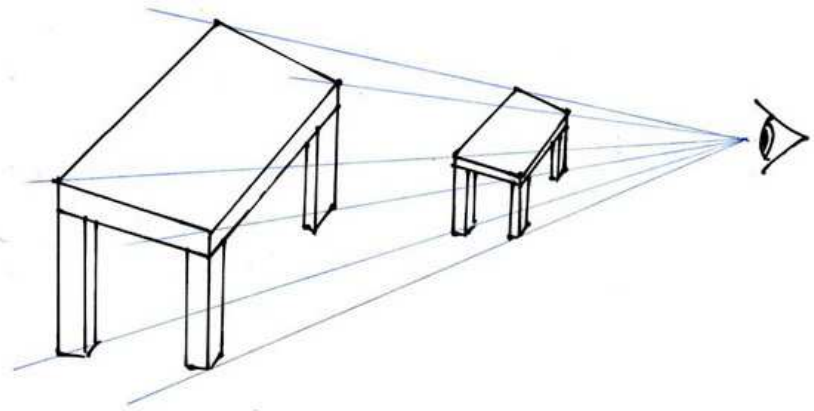

FIG. 21 – L'objet est quelquepart dans cette direction

La proposition *la lumière se propage en ligne droite* serait donc, dans cette attitude, un *postulat*, qui aurait la qualité de *ne pas être en contradiction avec l'expérience.*

Voir, c'est extrapoler un monde extérieur possible, compatible avec la structure logique que nous construisons autour de nos perceptions.

En relation avec cette attitude, nous pouvons remarquer l'importance de l'expérience du miroir, car *le miroir ne peut être vu que si l'on se voit en train de voir.* En effet, pour comprendre *ce que fait* un miroir, il faut se dessiner la figure 19, dans laquelle on représente :

– l'objet
– le miroir
– le sujet
– les rayons lumineux (lignes droites)
– les angles corrects de réflexion des rayons sur le miroir (lois de Descartes)

C'est seulement en ayant la figure 19 "présente à l'esprit" qu'on peut *voir le miroir lui-même*. Sinon on ne peut avoir conscience que ce qu'on voit est une *image virtuelle* symétrique de l'objer réel. On ne peut pas voir sans comprendre. Bien sûr, on peut voir autre chose si on comprend autre chose, mais cet autre chose sera-t-il lui aussi cohérent avec le reste ? On peut se trouver face à une situation paradoxale, un conflit de significations. En général, ce conflit se détecte sur les bords, le *cadre* du miroir. Face à un miroir infini, nous n'aurions aucun moyen d'affirmer que c'est un miroir, nous serions obligé de conclure que l'espace lui-même est symétrique, et que l'on se cogne en essayant de passer le plan de symétrie. En ayant la possibilité de passer derrière le miroir et en interprétant ce que nous voyons sur le bord du miroir, nous pouvons dire : telle partie de ce que je vois est compatible avec une vision directe, telle autre partie est compatible avec une vision réfléchie, et cela est compatible avec un miroir plan de telle épaisseur dont la limite serait ici, etc.

En conséquence, quand on regarde un miroir (et qu'on le *voit*, c'est-à-dire qu'on le comprend), alors on *voit la vision*, c'est-à-dire qu'on voit les conventions, plus ou moins explicites, choisies par les hommes pour extrapoler le monde extérieur à partir des perceptions de contact. On se voit ainsi participer à cette société construite par ces conventions sur l'espace, qui sont en relation avec le langage des hommes, et l'organisation de leurs connaissances. Tout cela est-il conscient pour tout le monde ? Les autres voient-ils la même chose que moi ? Les physiciens voient-ils mieux que les personnes non-éduqués à l'optique ? Les peuples sans miroir ont-ils les mêmes conceptions de l'espace ? Le partage de mêmes conceptions à propos de ces questions ne peut se faire que par l'échange dans le langage, et sont donc tributaires des structures logiques. Voir est un fait culturel.

2.4 Qu'est-ce qu'une *mesure* ? Relation avec la vision

Qu'est-ce qu'une *mesure* en physique ? Prenons l'exemple d'une mesure de longueur, la mesure de la longueur de la table avec un mètre ruban (figure 22).

On construit un *autre* objet (le mètre lui-même, en le déroulant), dont on *connaît la longueur par construction*. C'est sa fonction : le mètre à ruban nous permet de construire une droite de longueur arbitraire, par exemple ici 63 cm. Si les deux objets, la table et le mètre, ont une longueur *indistingable*, alors on dira que la longueur de la table est égale à 63 cm. On dit qu'on a *mesuré* la table. Cela ne veut pas dire qu'on a *prélevé à la table* une information sur elle. La seule chose qu'on a fait avec la table est la *comparaison indistingable de longueur* avec l'autre objet, le mètre, qui est, lui, *construit*, et prétendument *connu* par cette construction. Ses graduations résultent d'une *comparaison* avec une longueur étalon.

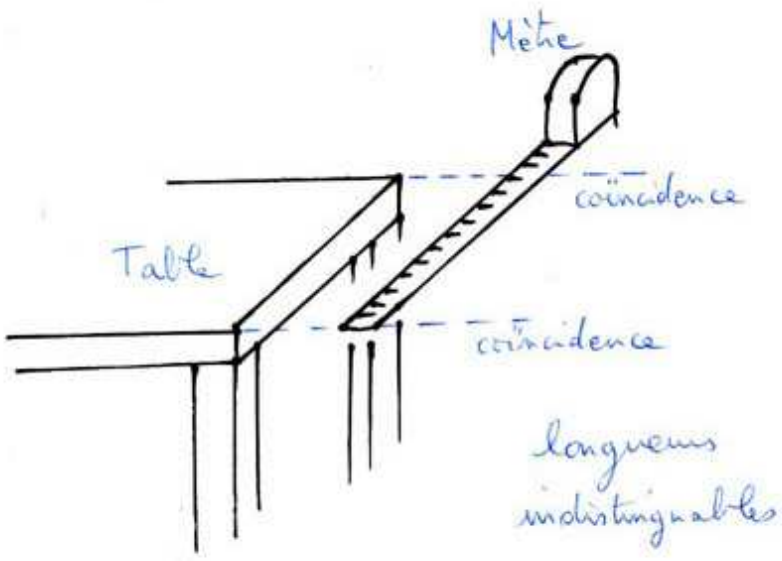

FIG. 22 – Mesure de la longueur de la table

Une mesure est la *construction* d'un *autre* objet que l'objet mesuré. Le nombre qui en résulte ne vient pas de l'objet mesuré, mais de l'objet autre. C'est la comparaison d'indistingabilité qui nous permet de transférer le nombre, depuis l'autre vers le mesuré.

On n'a pas besoin de savoir ce que *sont* (dans leur *essence*) : l'*espace*, les *objets*, la *longueur* pour faire cette comparaison. On s'impose de faire un nombre minimal d'hypothèses. On n'a pas besoin de savoir ce qu'*est* la longueur pour dire *de même longueur*.

Précisons ce que nous appelons *comparaison d'indistingabilité*. Pour cette mesure de longueur, il s'agit de vérification aux deux extrémités (et non tout au long de la longueur) : à chaque extrémité, on ne doit pas pouvoir dire que le lieu n'est pas le même, sinon on ajuste, on déplace. Il ne s'agit pas d'une égalité de lieu ni d'une égalité de longueur, mais il s'agit de non-distinction d'inégalité (deux négations), soit à l'oeil nu, soit avec l'aide d'un appareil. La précision de l'appareil de comparaison définit ce que l'on appelle *incertitude de la mesure*.

Prenons un autre exemple, la balance de Roberval (figure 23).

Ici aussi, on construit un autre objet. Comme il s'agit d'une mesure de masse, on construit une masse connue et on a besoin d'une comparaison d'indistingabilité de masses. La balance n'est que l'instrument de comparaison. Si on ne connaît rien ni de l'essence de la farine, ni de l'essence de la masse, on peut mesurer la masse de la farine par l'intermédiaire de la connaissance de la masse fabriquée. La masse fabriquée est constituée d'addition de *masses marquées* construites par comparaison à une masse étalon.

Encore un exemple, la mesure de durée. Le temps n'est pas donné, il est construit par

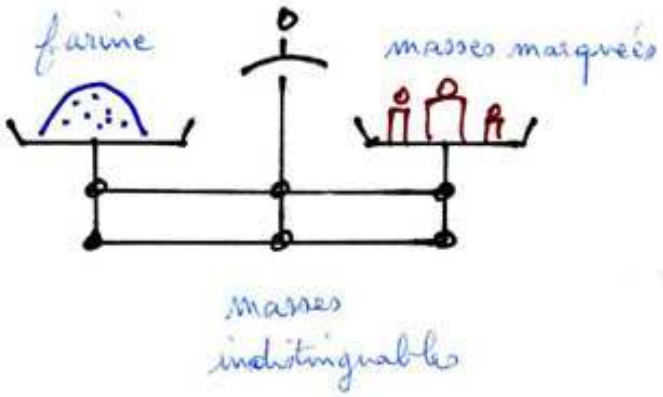

FIG. 23 – Balance de Roberval

les mouvemements. Un coureur à pied crée un mouvement qui engendre une durée. Si je le chronomètre, mon chronomètre est un autre mouvement, qui *construit une autre durée*. Je *compare ces deux durées de façon indistingable* par une coïncidence au départ et une coïncidence à l'arrivée. Il faut avoir une notion de simultanéïté qui est une indistingabilité temporelle locale.

Prenons un exemple un peu plus complexe, celui de la balance romaine, figure 24.

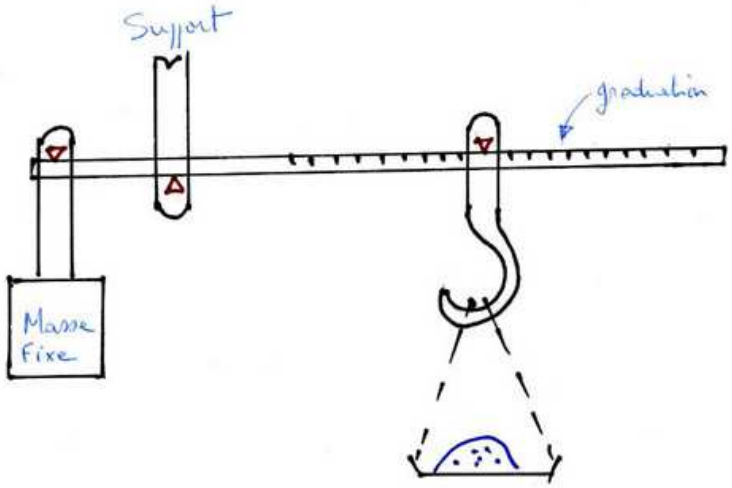

FIG. 24 – Balance romaine

Ici, on *fabrique une longueur*, on fait une *comparaison indistingable* de *couple*, on en déduit la *masse*. Pour graver les traits, on va *étalonner*, c'est-à-dire qu'on va chercher l'équilibre avec des masses de références sur le plateau et on va graver un trait pour chaque masse de référence. On aura donc en fait là aussi comparé les masses à mesurer à une masse étalon.

Mais on peut aller plus vite si on connaît la loi des leviers (qui est démontrable à partir d'une hypothèse de symétrie de l'espace [6]). Dans ce cas, la fabrication-comparaison aux étalons concerne d'une part la masse fixe de gauche qui est comparée à l'étalon de masse et d'autre part les longueurs de droite qui sont comparées à l'étalon de longueur.

Osons généraliser. Nous dirons que dans toute mesure, il y a toujours :

– fabrication d'un autre objet, dont la connaissance résulte de sa méthode de fabrication,
– comparaison indistingable d'une grandeur.

La comparaison peut être indirecte comme dans le cas de la balance romaine. Elle peut s'appuyer sur des lois physiques connues, comme nous l'avons mentionné pour la loi des leviers.

Il n'y a pas de mesure absolue. Il y a comparaison avec des étalons, plus ou moins directement. Les étalons sont fabriqués par les hommes, selon des conventions, et en relation avec les lois physiques considérées comme bien connues.

Étendons cela à la vision. *La vision est une mesure* : voir, c'est *construire un autre objet*, l'*image*, qui dans certaines conditions est *indistingable* de l'objet *vu*. On peut dire aussi : *voir*, c'est *imaginer* le monde extérieur (si on met en évidence le radical commun entre image et imaginer).

Reste à préciser la nature de cette indistingabilité. Dans le cas de la gravure de Dürer, il s'agit de la superposition-confusion de l'objet et de l'image. Cette superposition est celle permise par la perspective. Nous pouvons donc dire que notre façon de voir est tributaire de cette façon de *comparer* qui est fondée sur la perspective.

Mais il peut s'agir aussi de la superposition-confusion de deux images (figure 25), ou plus généralement de la comparaison sans superposition entre deux représentations, ou entre un objet et sa représentation, et cela nous permet d'envisager des comparaisons d'indistingabilité qui ne seraient pas reliées à la perspective.

Pour reprendre l'analogie entre vision et mesure, la fabrication de l'image serait la *fabrication de l'objet autre*, et l'oeil serait l'instrument de *comparaison indistingable*.

Dans ce schéma, la *vision* serait donc plutôt un acte moteur de la main (ou plus généralement de ses prolongements techniques), et non un acte de l'oeil. Le corps du sujet agirait pour transformer les perceptions de comparaison de l'oeil en gestes de la main, pour ajuster l'image par itération de la fonction du corps.

Si l'on n'agit pas sur le monde extérieur, on ne peut pas voir, de même qu'on ne peut pas mesurer.

Dans la vision, l'oeil n'assurerait qu'une partie : la *comparaison*. Ainsi, on comprend que

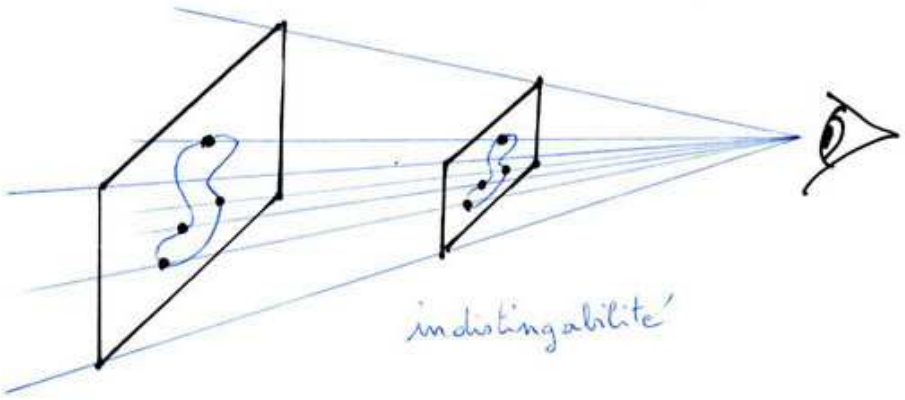

FIG. 25 – Comparaison d'indistingabilité

l'acte de l'artiste nous aide à voir. On ne manque pas de témoignages de peintres ou de photographes qui nous disent qu'ils font ça parce que ça leur permet de voir. Ça leur permet aussi de partager leur vision, ils nous montrent ce qu'ils voient, que nous ne voyons pas sans leur intervention.

Le rôle particulier de la perspective serait d'être une méthode particulière de *comparaison : par superposition*. Il s'agirait de faire que la superposition de l'objet et de l'image devant notre oeil soit comme l'objet seul. C'est la production d'une image qui disparaît lorsqu'elle est superposée à l'objet (à moins que ce ne soit l'objet qui disparaisse). C'est bien ce dont il s'agit dans la gravure de Dürer où ce tableau est un cadre vide. Ce serait une façon particulière de voir, celle utilisée en occident depuis la Renaissance. Elle aurait rendu possible l'apparition de la photographie, comme produisant des représentations compatibles avec notre façon de voir.

2.5 Comment connaissons-nous l'espace et les objets ?

Nous devons donc imaginer l'espace et les objets, en testant la vraisemblance ou cohérence logique de ce que nous avons imaginé. Nous devons aussi mettre ce que nous avons imaginé à l'épreuve des autres perceptions. Car le réel existe, nous ne pouvons pas imaginer l'espace n'importe comment, le réel réagit, on se cogne. Toutes les perceptions doivent être en accord avec ce que nous avons imaginé. L'ensemble doit *sauver les apparences*.

Si nous faisons l'hypothèse *la lumière se propage en ligne droite*, alors nous pouvons utiliser la fonction inverse de la perspective pour imaginer la troisième dimension, la profondeur. Mais la perspective n'est pas inversible ! Nous le savons par expérience, car nous savons qu'avec un seul oeil il est difficile de voir la profondeur (nous savons qu'il est par exemple difficile d'enfiler une aiguille). Il nous faut donc nous déplacer dans cet espace des objets (ou bien

avoir deux yeux), pour pouvoir faire des *recoupements entre plusieurs points de vue* (figure 26).

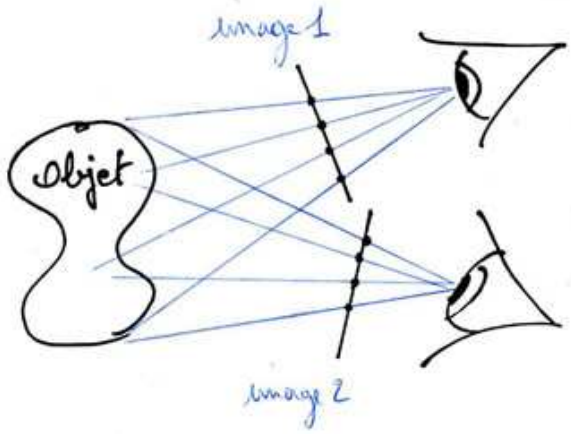

FIG. 26 – Accès à la troisième dimension

Nous pouvons ainsi imaginer un espace d'objets à trois dimensions qui soit cohérent. Le travail est le suivant (figure 27) :

- imaginer un espace euclidien à 3 dimensions (3D), imaginer que les objets sont situés dans cet espace et les points de vue aussi. À chaque point de vue est associée une image à deux dimensions, 2D, (en supposant par exemple que cette image est plaquée sur une sphère).
- considérer la perspective inverse pour passer des images 2D aux objets en 3 dimensions (invention des objets)
- contrôler, par la perspective directe (comparaison par l'oeil), que les objets imaginés redonnent bien les images initiales. Sinon, reboucler la boucle jusqu'à ce que ça colle...

Nous nous inspirons pour cela de Bertrand Russell [2], pour qui il y a *a priori* trois espaces distincts :

- l'espace des points de vue (3D)
- l'espace de chaque image (2D)
- l'espace des objets (3D)

À chaque point de vue est associée une image 2D. L'ensemble de toutes les images forme donc un espace identique (isomorphe) à l'espace des points de vue. La perspective inverse nous permet d'inventer les objets et de les situer dans l'espace des points de vue. On est ainsi conduits à identifier l'espace des points de vue et l'espace des objets. On peut ensuite placer également les images dans ce même espace. La perspective nous a ainsi permis de confondre ces trois espaces en un seul (figure 27).

Russell ne parle pas d'*images*, mais d'*aspects*, et pour lui un objet n'est que la *classe d'équivalence de ses aspects*, de même qu'en arithmétique un nombre entier positif est iden-

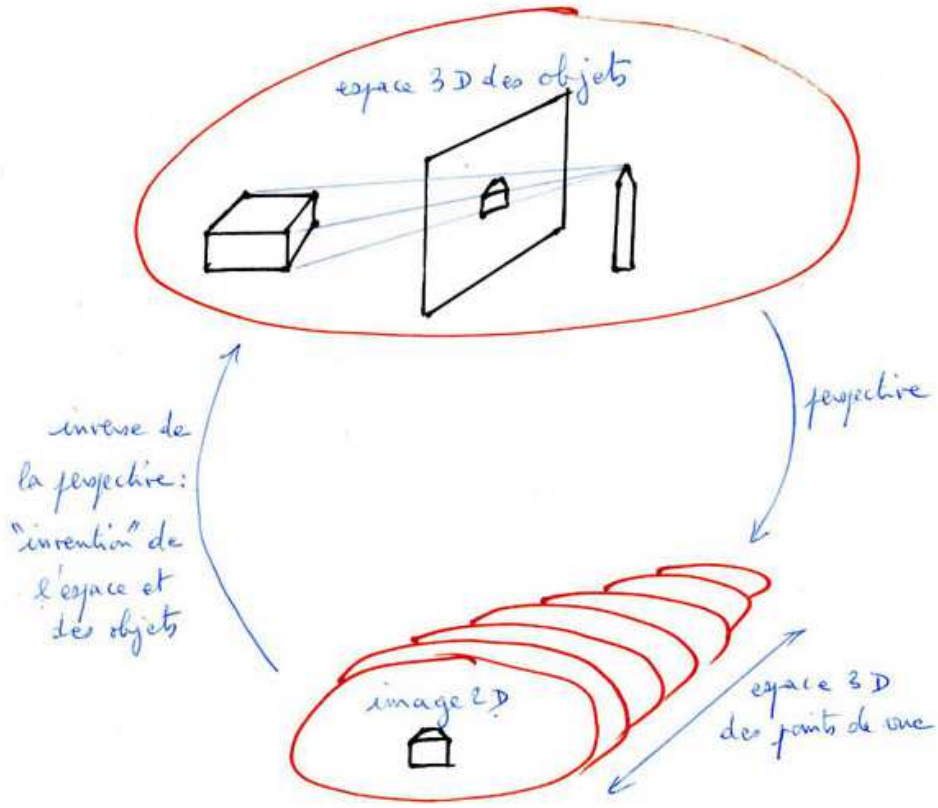

FIG. 27 – Schéma de la vision

tifié à *la classe d'équivalence des ensembles de même cardinal*. Pour Russell, l'objet n'a pas d'essence autre que cette définition logico-mathématique.

Nous nous sommes beaucoup inspiré de la conception de Russell, mais dans cette conception une chose nous semble insatisfaisante, c'est la notion d'*aspects* (nos *images* ont le même inconvénient), qui risquent d'être confondus avec les *idées* ou *formes* de Platon : s'agit-il d'images mentales (qui n'existent que dans l'esprit du sujet) ou d'images réelles (avec quelle signification ?), dans le monde extérieur ou non (dans le monde des idées de Platon), préalables (à la vision et éternelles) ou non ? Il nous semble qu'on peut éviter toutes ces difficultés en rejetant cette notion d'aspect ou d'image et en considérant uniquement notre notion de comparaison d'indistingabilité pour les sens. Il n'est pas nécessaire de dire l'essence de ce qui est indistingable. Il suffit de savoir si on distingue ou non, si on perçoit ou non une différence.

En revanche, la notion de *classe d'équivalence* nous paraît être la bonne notion pour définir ce qu'est un *objet*, et dans le sens suivant : si des perceptions multiples (perçues par une même personne ou plusieurs) peuvent être regroupées sous un même discours et porter le même nom, alors il s'agit là de l'apparition d'un objet.

Le sujet *imagine* l'espace 3D dans lequel se trouvent *à la fois* l'objet, la représentation et le point de vue. Le sujet teste en permanence la cohérence de tout cela en ne disposant que de ce qui est fourni par ses sens (de contact). Il doit tester la cohérence de l'ensemble qui inclut perceptions, imagination et connaissances verbalisées. Le réel s'introduit ici par le fait que cette cohérence implique les perceptions dans la boucle de la figure 27.

D'une certaine manière, l'espace et les objets sont toujours *virtuels* car imaginés par l'observateur, en tous cas si l'on entend *virtuel* au sens des *mondes virtuels* des jeux video, c'est-à-dire des mondes imaginés. Même si, certes, certains de ces mondes peuvent être ce que l'on a appelé autrefois *fantaisie*.

2.6 Synthèse d'image et simulation

Dans la synthèse d'image par ordinateur, les objets et l'espace existent matériellement sous forme d'un codage de nombres dans la mémoire de l'ordinateur. On appelle ça la *base de données 3D*. La perspective est *calculée*, à l'aide de formules mathématiques décrivant la propagation de la lumière en ligne droite, afin de fabriquer l'*image 2D*. On dit alors que le calcul est une *simulation*, et qu'on fait une *synthèse d'image*, par analogie probablement avec la synthèse chimique, dans laquelle on construit des molécules suivant le modèle de ce qui existe déjà dans la nature, mais en utilisant d'autres voies, artificielles.

Le schéma (figure 28) est exactement le même que pour la vision, sauf que plusieurs choses sont effectuées par l'ordinateur : les objets sont réduits à des coordonnées enregistrées dans la mémoire. La propagation de la lumière est simulée par le calcul. L'image est dessinée sur

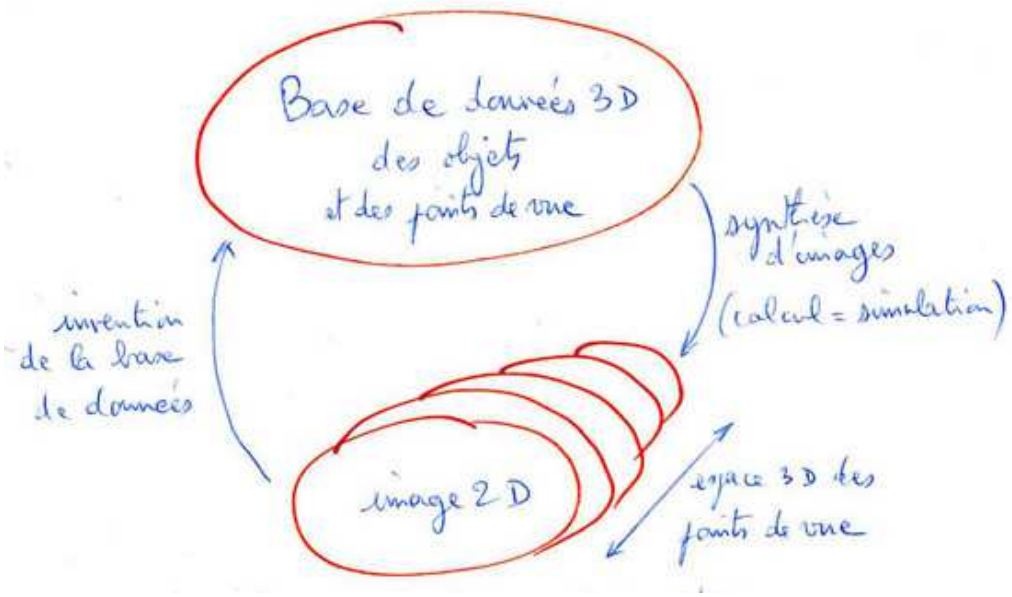

FIG. 28 – Schéma de la synthèse d'image (simulation)

l'écran ou l'imprimante.

L'oeil intervient pour tester si l'image lui convient, si elle correspond à ce qui avait été imaginé, soit parce qu'elle évoque du *déjà vu*, soit parce qu'au contraire elle permet d'aller vers la fantaisie.

Dans le contexte informatique, c'est le caractère (soit-disant) *immatériel* de la base de données ainsi que le calcul (*simulation*) qui font qualifier de *virtuels* ces objets.

Mais est-ce différent de la *vision* précédemment décrite ? En quoi l'espace des *objets de la réalité* est-il plus réel ? ou plus matériel ? en quoi la perspective faite par la lumière (dont la propagation est imaginée) est-elle plus tangible que celle faite par le calcul ?

Dans les deux cas, nos perceptions n'ont accès qu'aux rayons qui entrent dans notre oeil ! Or les images de synthèse sont également comparées avec nos yeux.

Certes, la simulation nous permet d'imaginer des mondes *non réalistes*, c'est-à-dire des situations que nous n'avons jamais rencontrées dans le monde habituel. Mais :

- Si on considère la simulation des mondes réalistes, en quoi la simulation est-elle moins crédible que la *vision* ?
- Si on considère la simulation des mondes fantaisistes, pouvons nous parier qu'il s'agit de situations que nous ne rencontrerons jamais ? Les seuls cas où nous pouvons en être sûrs, c'est lorsqu'il y a une contradiction flagrante entre un monde imaginé et l'expérience. Dans ce cas, nous sommes confrontés au *réel*.

Nous arrivons ainsi à une *définition du réel*. Nous pouvons dire que le réel est de l'imaginaire qui est conforme à l'expérience. Avec cette définition, le réel serait un cas particulier du virtuel. Le réel, il faut l'inventer et le simuler, et à ce titre, c'est du virtuel. Mais il réagit, il ne se laisse pas imaginer n'importe comment. Ce serait donc un sous-ensemble particulier de ce qui est imaginable.

Mais on peut aussi dire les choses autrement, et déboucher sur une *autre définition du réel.* On peut rejeter le réel en dehors de ce qui est imaginé. Dans tous les cas où ce qui est imaginé est conforme à l'expérience, alors on n'appellera pas cela *réel* mais *imaginaire*. Par contre, si on n'arrive pas à imaginer, à inventer un modèle qui permette de produire quelquechose conforme à l'expérience, alors on appellera ça *réel.* Dans ce cas, le réel serait au-delà de l'imaginé, au-delà du connu.

2.7 Le physicien et la mesure

Que fait le physicien ? Il élabore des théories et des modèles (conceptuels) et en calcule les conséquences (simulation). Si ces conséquences sont indiscernables de la réalité, alors il dit que ses théories sont satisfaisantes, car elles *sauvent les apparences*.

Comment peut-il savoir si *les conséquences des théories correspondent à la réalité* ? On nous dit que c'est en faisant des mesures et en comparant les résultats de mesure aux résultats de simulation. Mais une mesure est déjà construction d'un objet et comparaison. En fait, la simulation-comparaison est déjà dans la mesure !

Pour mieux l'appréhender, faisons le schéma de la mesure, figure 29.

Les trois schémas, de la *vision*, de la *simulation*, et de la *mesure* sont identiques. *Dans tous les cas, l'espace 3D et les objets sont imaginés* !

Ce que nous appelons *connaissance de la réalité*, c'est quand il n'y a pas de contradiction dans le texte de description de la nature, tout est cohérent. Si je tape sur une table réelle, je me cogne. Si la table est fantaisiste, il se peut que je ne ressente pas de douleur. C'est une question de cohérence entre les perceptions de vue et de toucher. Cohérence signifie : logique, dans le langage, et pour toutes les perceptions.

Prenons l'exemple qui est à l'origine des sciences de la nature, l'image du ciel étoilé. À partir des lois de la physique et des paramètres des mouvements de tous les corps célestes, on calcule (simulation ou synthèse) l'image du ciel à un instant spécifié. Si il y a une différence entre cette image et l'observation, alors on modifie le programme de l'ordinateur ou les paramètres des mouvements. On arrive alors à ce qu'il n'y ait plus de différence distingable entre les images du ciel (vues par l'intermédiaire des instruments de mesure) et les images du ciel calculées par la simulation. En quoi le ciel de la réalité a-t-il une essence différente du ciel simulé si aucune observation ne met en évidence une différence distingable ?

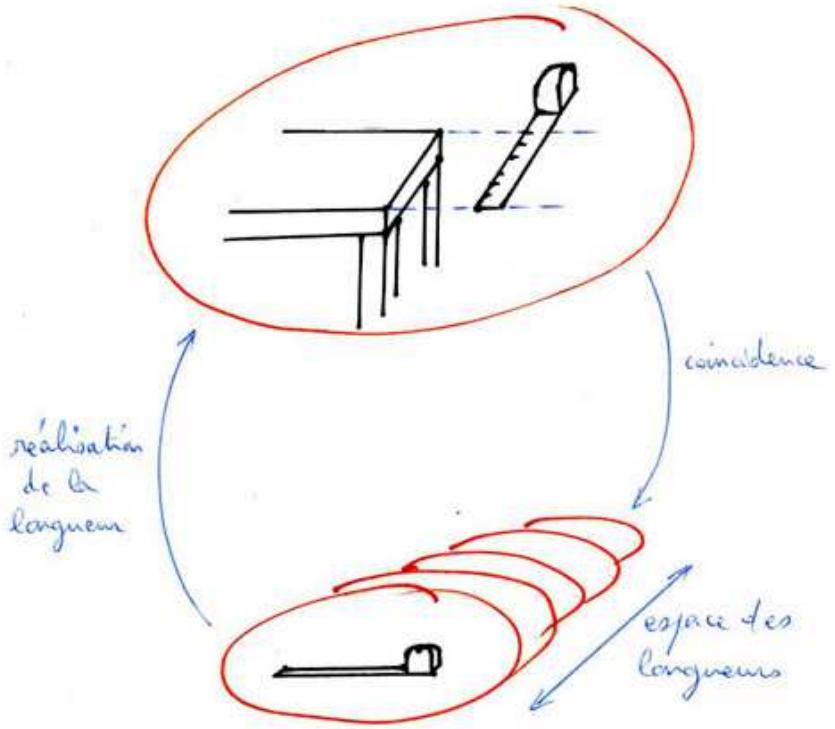

FIG. 29 – Schéma de la mesure en physique

En quoi l'informatique et le numérique seraient davantage *virtuels* ? Il y a toujours eu de l'*imagination* et du *calcul* dans la vision et dans la physique. Il y a toujours eu de la simulation. Ce qui est nouveau est la puissance de calcul des ordinateurs qui nous permet d'accéder à des simulations jusqu'alors impossibles, et qui permet l'interactivité dans le cas de simulations dynamiques.

2.8 Conclusion de cette deuxième partie

Nous avons été conduit à nous interroger sur l'essence des objets et de l'espace, et nous avons montré comment ces objets sont le résultat d'une construction, d'une extrapolation, sont produits par l'imagination. Cela n'enlève rien à leur réalité puisque cette construction doit être compatible avec les perceptions. Rappelons les étapes de notre argumentation :

- la réalité dépend du langage,
- la perception par l'oeil est une perception de contact,
- la propagation de la lumière en ligne droite est un postulat possible,
- le monde extérieur est extrapolé, imaginé et vérifié,
- c'est la cohérence logique de la construction qui nous satisfait,
- la mesure est construction d'un autre indistingable,

– la simulation est comme la vision et comme la mesure.

Un aspect important de cette conception réside dans le fait que la construction du monde extérieur est prise dans une boucle logique. Pour la vision, le monde est imaginé à l'aide de la perspective inverse et vérifié à l'aide de la perspective directe. Il y a une boucle qui réitère en permanence imagination-vérification. L'existence de cette boucle ne détruit pas l'édifice, mais cette boucle nous dit quelque chose sur la metaphysique associée. Elle nous dit que nous ne pouvons pas trouver des entités premières. Elle nous dit aussi que le monde est un monde possible, que nous ne pouvons pas dire s'il est l'unique monde possible, et sa possibilité n'est affirmée que par la cohérence logique de la construction.

Nous avons raisonné en utilisant l'entité *lumière* et nous lui avons attribué un statut très particulier :

– D'une part, *la lumière se propage dans l'espace-temps*. L'espace-temps apparaît alors comme un *préalable*, un *contenant* pour la lumière. C'est l'attitude que nous avons prise pour notre premier exposé.
– D'autre part, *l'hypothèse faite sur la propagation de la lumière permet d'imaginer, de construire l'espace, le temps et les objets*. La lumière apparaît ainsi comme un *préalable à la construction de l'espace-temps*. C'est l'attitude que nous avons prise pour notre second exposé.

Si nous faisons ainsi, la lumière est prise dans une apparente contradiction. Chacun des deux exposés qui précèdent illustre une des deux positions qui peuvent apparaître comme contradictoires. Mais cette contradiction peut disparaître si nous admettons que ces deux attitudes sont enchaînées dans une boucle algorithmique telle que celle que nous avons présentée pour la construction du monde extérieur. Ce n'est plus une contradiction, c'est une construction itérative.

Nous avons choisi un cadre *classique* pour cette description : d'une part, l'espace à trois dimensions était celui de la physique de Newton, d'autre part la propagation de la lumière était celle de l'optique géométrique. Dans ce cadre, l'espace de Newton est effectivement un contenant vide dans lequel la lumière se propage, et *voir* demande à utiliser la propagation de la lumière en ligne droite pour construire les objets.

Avec la relativité restreinte, l'espace n'est plus un contenant préalable, mais il est construit par un algorithme de synchronisation qui est fondé sur le postulat précisant que la vitesse de la lumière est la même pour tous les observateurs, quels que soient les mouvements relatifs. Il apparaît des phénomènes de contraction des longueurs qui doivent être pris en compte si l'on souhaite maintenir la cohérence logique lors de la construction du monde extérieur à partir des sens.

Avec la relativité générale, la lumière perd son statut d'objet premier, car elle ne sert plus à construire l'espace-temps, mais elle doit se propager dans un espace-temps qui est courbé localement par la présence de matière. C'est la matière qui acquiert là un statut premier.

Avec la mécanique quantique, les coordonnées d'espace et de temps sont des observables, donc des résultats de mesure. Ce qui est premier est la fonction d'onde d'une part et la procédure de mesure d'autre part. Pourtant, on cherche aussi à décrire la mesure quantique en termes d'opérations sur des fonctions d'onde. Ainsi, c'est la mesure qui se trouve prise dans une boucle logique comme l'était la lumière : la mesure est préalable à la mécanique quantique et on cherche à l'expliquer par la mécanique quantique.

Il nous semble que la boucle logique se déplace sans disparaître. Les statuts logiques des différents ingrédients évoluent, mais l'ensemble du discours ne peut être purement axiomatique comme le rêvaient les atomistes grecs. Le langage est toujours dans la boucle.

Conclusion

Notre façon de *voir l'espace et les objets* est reliée à notre façon de *construire des images à l'aide de la perspective*, et le lien entre les deux peut être appréhendé en interrogeant le statut logique de propositions de physique comme celles concernant la propagation de la lumière. Un tel lien ne tient que par le langage. Il nous semble qu'une autre société, avec un autre langage, qui construit ses images autrement, qui construit sa physique autrement, *voit* autrement. Ainsi la *camera obscura* structure la pensée occidentale. La notion même de *monde extérieur* n'est-elle pas issue de cette séparation effectuée par la cloison de la chambre entre un *dedans* et un *dehors* ? Ne serait-ce pas cette chambre qui nous pousse à penser nos représentations comme *intérieures* ? C'est suggéré par Lacan à propos de l'idéalisme de Berkeley [7].

Y aurait-il une façon de voir meilleure que d'autres ? Ce pourrait être une question de physicien qui cherche à améliorer ses théories. Il nous semble que l'existence de la boucle logique que nous avons mentionnée, et qui nous apparaît nécessaire, enlève toute signification à une telle question. La science ne peut que chercher à étendre le domaine de cohérence de son discours, en simplifiant ses équations pour atteindre une plus grande élégance, mais cet édifice pourra à tout moment être remplacé par un autre, arbitrairement différent.

Remerciements

Je remercie Claude Lothier, auteur de l'exposition « Persistante Perspective », présentée en 2004 à l'École supérieure des beaux arts du Mans, pour nos fertiles discussions à propos de la perspective.

Références

[1] Monique Sicard, *La fabrique du regard*, Odile Jacob, 1998.

[2] Bertrand Russell, *Our knowledge of the external world*, 1914, réédition Routledge 1993-2000.

[3] Louis Gaudart et Maurice Albet, *Physique photographique*, Le temps apprivoisé, 1997.

[4] Platon, *La république*, livre VII.

[5] Einstein, A., *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, Annalen der Physik, Vol. 17, p. 891–921, 1905.

[6] Ernst Mach, *La Mécanique*, Hermann, 1904, réédition Jacques Gabay 1987.

[7] Jacques Lacan, *D'un Autre à l'autre*, séminaire 16 (chapitre 18, séance du 30 avril 1969), Éditions du Seuil, mars 2006.