

54191  
 (20)  
 = B =

Bibliothèque de l'Université de Liège  
 de Liège — PÉRIODIQUES

UNIVERSITÉ DE LIÈGE (BELGIQUE)  
 INSTITUT D'ASTROPHYSIQUE

Extrait du « Bulletin de la Société Royale de Liège »  
 n° 2, février-1950

16 VI 1950

## Le jumelage des systèmes dispersifs au sein des spectrographes

par P. SWINGS

Professeur à l'Université de Liège

### RÉSUMÉ

On peut combiner plusieurs systèmes dispersifs au sein d'un même spectrographe, de façon à couvrir un domaine spectral très large avec une dispersion linéaire suffisante, en une seule exposition. La méthode s'applique à tous les types de spectrographes; elle est décrite dans le cas de quelques instruments à réseaux concaves, réseaux plans et prismes.

Il arrive à tout spectroscopiste industriel et même, parfois, au spectroscopiste pur, de souhaiter que son spectrographe remplisse les trois conditions suivantes :

- (a) que l'instrument soit compact, pratique et peu encombrant ;
- (b) qu'aucun changement important ou réglage délicat ne soit requis pour passer d'une région spectrale à une autre ;
- (c) qu'un domaine spectral très vaste soit couvert en une seule exposition, avec une dispersion et une résolution qui, dans tout le domaine spectral utilisé, suffisent pour le problème spectrochimique considéré et permettent la détection simultanée du plus grand nombre possible d'éléments.

Les instruments habituels ne vérifient pas l'ensemble des conditions énumérées ci-dessus. Les spectrographes de haute dispersion des types habituels, qu'ils soient à prismes ou à réseau, ne peuvent couvrir qu'un domaine spectral restreint à moins de devenir très encombrants. La plupart des instruments connus couvrent normalement, sur une plaque, la région de



$\lambda$  2400 à  $\lambda$  3600 ou moins encore. Si l'opérateur désire une autre région, il doit modifier l'instrument. S'il s'agit d'un spectrographe à prismes, il faut remplacer les prismes en quartz par d'autres en verre et modifier les positions des lentilles et du porte plaque. S'il s'agit d'un instrument à réseau, il faut modifier l'angle du réseau, ou la position du châssis ou celle de la fente. En tout cas, on doit avoir recours à des expositions successives si l'on veut couvrir une vaste région. Ceci implique la constance de la source lumineuse, ce qui est souvent exclu, comme, par exemple, dans les cas où se produisent des phénomènes de diffusion fractionnée ou bien lorsqu'on dispose seulement d'une très petite quantité de substance à vaporiser dans la source lumineuse. Les instruments habituels à faible dispersion se heurtent à des difficultés analogues.

Il arrive fréquemment que le spectrochimiste doive se passer du domaine visuel, parce que son spectrographe ne s'adapte pas à cette région, alors que beaucoup de renseignements importants pourraient être tirés de la région de grande longueur d'onde, par exemple au sujet des alcalins, du soufre, de l'argon, etc... Ceci se présente dans les analyses spectroscopiques d'eaux, de sables, verres, minerais, roches, végétaux, aliments, produits alimentaires ou pharmaceutiques, poussières, échantillons biologiques, etc...

On peut résoudre le problème de façon élégante en combinant deux systèmes dispersifs au sein d'un seul instrument, utilisant une fente unique et un ou deux châssis. Par un choix convenable des systèmes dispersifs, on peut, sans accroître de façon sérieuse l'encombrement du spectrographe, couvrir en une seule exposition, un domaine spectral double du domaine habituel. Un tel spectrographe ne requiert aucun ajustement et est aussi compact qu'un instrument du type usuel.

Ce principe peut être appliqué à n'importe quel type de système dispersif et de montage. Je vais illustrer ici le cas du jumelage pour les types suivants :

- (a) montage Paschen de réseau concave;
- (b) montage Wadsworth de réseau concave;
- (c) montage modifié (« replié ») Wadsworth de réseau concave;

(d) montage à réseau plan;

(e) montage du type Littrow à prismes.

Il est toutefois clair que le principe est tout-à-fait général. Au lieu de deux systèmes dispersifs, on pourrait en employer trois ou plus. D'ailleurs, l'application du jumelage peut aussi se faire au montage Eagle du réseau concave, au montage classique (Cornu) des prismes, etc... Les considérations qui suivent s'appliquent surtout à l'enregistrement photographique des spectres. Toutefois, la plupart des instruments décrits pourraient être aisément adaptés aux mesures directes d'intensités par multiplicateurs d'électrons ou récepteurs similaires.

(a) *Jumelage de réseaux concaves en montage Paschen*

Supposons que nous employions deux réseaux concaves ayant le même rayon de courbure, mais présentant des nombres différents de traits par millimètre. Illuminons ces deux réseaux à partir d'une seule fente, par l'intermédiaire d'un séparateur de faisceaux (« beam splitter »); la fente doit évidemment être placée sur la portion du cercle de Rowland rendue commune pour les deux réseaux grâce au « beam splitter ». Les deux spectres se formeront sur une surface cylindrique, passant par la fente et dont le diamètre est égal au rayon de courbure commun des réseaux. En fait, ces deux spectres seront parallèles et séparés par une distance égale à l'écartement entre les centres des deux réseaux. Une excellente méthode consiste à fixer la position de la fente pour que les régions centrales des spectres coïncident avec les centres de courbure des deux réseaux, le ou les châssis épousant le « cylindre de Rowland ». On peut, bien entendu, obtenir les deux spectres sur la même plaque (ou le même film si un faible rayon de courbure est employé) ou sur deux plaques différentes. Il y a d'habitude intérêt à employer deux plaques d'émulsions différentes.

L'exemple suivant convient particulièrement bien pour la plupart des problèmes spectrochimiques :

54191 D  
(20)

Réseau I, 24324 traits<sup>(1)</sup> par pouce, rayon de courbure 150 cm couvre la région  $\lambda$  2000 —  $\lambda$  4000 avec une dispersion de 6.7 A/mm sur un cliché de 30 cm;

Réseau II, 12162 traits par pouce, rayon de courbure 150 cm, couvre la région  $\lambda$  4000 —  $\lambda$  8000 avec une dispersion de 13.4 A/mm sur un cliché de 30 cm.

Un instrument combinant ces deux réseaux permet de couvrir tout le domaine de  $\lambda$  2000 à  $\lambda$  8000, en une seule exposition, sur deux clichés de 30 cm. Le spectrographe est peu encombrant (environ 1 m 60 de long); il reste constamment réglé; une cache permet de n'utiliser qu'un des deux réseaux si on le désire. Comme c'est le cas pour tout montage Paschen, l'instrument est évidemment astigmatique lorsque la source est projetée sur la fente. On peut rendre le système pratiquement stigmatique en suivant l'artifice classique de Sirks; dans ce cas, la source doit être placée à 12.6 cm en avant de la fente<sup>(2)</sup>. Pour éliminer dans le spectre  $\lambda$  4000 —  $\lambda$  8000 du réseau II, le second ordre du domaine  $\lambda$  2000 —  $\lambda$  4000, il suffit de placer un écran absorbant l'ultraviolet: celui-ci peut être incorporé dans le « beam splitter ».

Ce principe que j'ai étudié en 1943 et 1944 a été réalisé par la firme Lane-Wells de Los Angeles, Calif., qui a généreusement offert le premier instrument du type à l'Institut d'Astrophysique de l'Université de Liège<sup>(3)</sup>. Les dispersions avaient été choisies en vue d'analyses spectrochimiques. Une dispersion de 6.7 A/mm dans l'ultra-violet suffit pour résoudre la plupart des problèmes spectroscopiques rencontrés en chimie ou métallurgie. Dans le domaine visible où, suivant l'échelle de longueurs d'onde, les raies sont moins nombreuses que dans l'ultraviolet, une dispersion de moitié, 13.4 A/mm, avait été adoptée: celle-ci était amplement suffisante pour pratiquement tous les problèmes spectrochimiques. Bien entendu, rien ne s'opposerait

<sup>(1)</sup> Les nombres de traits correspondent à des réseaux qu'il était possible d'obtenir commercialement en 1944, aux Etats-Unis.

<sup>(2)</sup> Ce point est l'intersection de la droite fente-réseau et de la tangente au cercle de Rowland à la longueur d'onde considérée.

<sup>(3)</sup> Cet instrument couvre le domaine  $\lambda$  1940-  $\lambda$  8130.

à ce que soient employés des réseaux de plus grand rayon de courbure, ou présentant un plus grand nombre de traits au mm, fournissant une dispersion linéaire plus élevée.

Pour la plupart des applications, des réseaux de 50 x 25 mm suffisent si on adopte un rayon de courbure de 150 cm. On augmente toutefois la luminosité en employant des réseaux plus grands; la luminosité n'est pas tout-à-fait proportionnelle à la surface du réseau à cause de l'effet d'astigmatisme. On doit autant que possible, employer les réseaux taillés de façon à fournir le maximum de diffraction dans le premier ordre, vers  $\lambda$  3000 pour le réseau I et vers  $\lambda$  6000 pour le réseau II.

Si c'est nécessaire, on peut changer la dispersion linéaire ou le domaine couvert en remplaçant un des réseaux ou les deux. Par exemple, avec l'instrument décrit plus haut, on peut couvrir la région  $\lambda < 2710$  avec une dispersion de 4.5 A/mm, sur une plaque de 17 cm, en remplaçant le réseau I par un autre de même courbure ayant 36570 traits par pouce.

L'instrument décrit ne couvre pas l'infrarouge photographique  $\lambda > 8000$ . Il peut pourtant arriver qu'on désire détecter des raies sensibles dans l'infrarouge, par exemple le doublet de résonance du césium ( $\lambda$  8943.5,  $\lambda$  8521.4), les raies du soufre ( $\lambda$  9212.91, 9228.11 et 9237.49), ou la raie la plus sensible de l'argon ( $\lambda$  8115.31). Certaines bandes moléculaires intéressantes le spectrochimiste apparaissent aussi au delà de  $\lambda$  8000.

On peut couvrir le domaine  $\lambda$  5300 —  $\lambda$  10700 en remplaçant le réseau II par un autre ayant 9000 traits par pouce; ou encore le domaine  $\lambda$  4500 —  $\lambda$  9000 en employant un réseau de 10.670 traits par pouce. Cette seconde solution convenant bien au cas du césium est avantageuse, parce qu'elle permet l'emploi d'émissions assez rapides comme les IN-D'Eastman.

Si on désire qu'il n'y ait aucune lacune entre les régions spectrales fournies par les deux réseaux, on peut associer au réseau « visuel » à 9000 traits par pouce, un réseau « ultraviolet » à 18000 traits par pouce, fournissant le domaine  $\lambda$  2600 —  $\lambda$  5400. On encore associer au réseau « visuel » à 10670 traits, un autre à 21340 traits qui couvrirait  $\lambda$  2250 —  $\lambda$  4500. Cette seconde combinaison serait particulièrement efficace; les dis-



persions linéaires seraient seulement 11 % plus faibles que dans le système des réseaux I et II. Bien entendu, les domaines spectraux seraient accrues en employant de plus grands chassiss; la longueur de cliché adoptée, 30 cm, a été choisie pour des raisons de commodité. Les chassiss se trouvent très près de la fente, ce qui peut rendre les opérations rapides et faciles.

Même en employant une émulsion photographique à grain assez fin, permettant de séparer, en moyenne, deux traits distants seulement de  $15 \mu$ , on ne peut utiliser toute la résolution possible dans l'ultraviolet avec le réseau de 24000 traits par pouce; dans le domaine visible, la résolution possible du réseau peut être atteinte. Toutefois, dans le spectrographe décrit ici, la résolution effective n'est pas définie par les réseaux, mais bien par les émulsions photographiques, la largeur de fente et la largeur physique des raies.

(b) *Jumelage de réseaux concaves en montage Wadsworth*

On peut développer des considérations analogues à celles qui précèdent, dans le cas où les réseaux I et II sont employés en lumière parallèle. Un collimateur couvrant les deux réseaux concaves est alors requis. Le montage est stigmatique, ce qui, dans certains cas, constitue un avantage sur le montage Paschen puisque la distribution des atomes et molécules émetteurs au sein de la source est révélée. Un montage stigmatique permet aussi l'emploi de disques tournants, de coins neutres ou autres dispositifs photométriques. Les clichés épousent la même courbe parabolique si les domaines spectraux sont choisis de façon adéquate.

L'exemple suivant illustre le modèle d'instrument.

Réseau I, 24324 traits par pouce, rayon de courbure 300 cm, couvrant stigmatiquement la région  $\lambda$  2000 —  $\lambda$  4000 avec une dispersion moyenne de 6.7 Å/mm sur un cliché de 30 cm;

Réseau II, 12462 traits par pouce, rayon de courbure 300 cm, couvrant stigmatiquement la région  $\lambda$  4000 —  $\lambda$  8000, avec une dispersion moyenne de 13.4 Å/mm (le second ordre de  $\lambda$  2000 à  $\lambda$  4000 étant intercepté par un écran en verre) sur un cliché de 30 cm.

Les chassiss et réseaux ont la même normale; le faisceau parallèle atterrit les réseaux à un angle d'incidence de  $160^\circ 42'$ . Le collimateur doit de préférence être un miroir parabolique hors d'axe. L'exemple ci-dessus a été étudié pour des réseaux de  $100 \times 62$  mm, séparés d'environ 20 mm. Le miroir collimateur parabolique doit alors avoir une distance focale d'environ 155 cm; son diamètre est de l'ordre de 170 mm; l'angle hors d'axe environ  $6^\circ$ ; le miroir peut être taillé en forme de rectangle. Dans certains cas (réseaux de très petite diagonale par rapport à leur courbure), le miroir collimateur parabolique peut être remplacé par un miroir sphérique. L'instrument présente à peu près le même encombrement que le spectrographe jumelé du type Paschen. Dans ce cas, la fente et les chassiss sont à des extrémités opposées du spectrographe.

Tout comme dans le cas du montage Paschen, on peut modifier les domaines spectraux couverts, en changeant de réseaux. Par exemple, on peut employer un réseau de 21340 traits par pouce (couvrant  $\lambda$  2270 —  $\lambda$  4570, centre à  $\lambda$  3420) et un autre de 10670 traits par pouce (domaine  $\lambda$  4550 —  $\lambda$  9120 centre à  $\lambda$  6840).

(c) *Jumelage de réseaux concaves en montage Wadsworth « replié »*

Dans certains cas, on peut reprocher à l'instrument précédent, la distance séparant la fente du chassiss. On peut éliminer cette difficulté en introduisant avant les réseaux un miroir plan « repliant » en quelque sorte le faisceau. Dans le cas de réseaux de faible rayon de courbure (p. ex. 150 cm), un tel montage de Wadsworth replié peut aisément se construire en plaçant les réseaux et chassiss horizontalement. La fente et les chassiss peuvent être à hauteur commode pour l'opérateur. L'ensemble peut être construit de manière à rendre les déplacements faciles (spectrographe sur roues!).

(d) *Jumelage de réseaux plans*

De tels réseaux seront utilisés en lumière parallèle; des chambres photographiques sont alors requises. On peut concevoir

un instrument comportant tout un jeu de chambres interchangeables fournissant ainsi un jeu de dispersions linéaires possibles et couvrant de ce fait, des besoins très divers. Les chambres pourraient être du type de Schmidt, certaines très lumineuses. Dans le cas des grandes distances focales, un miroir sphérique suffirait comme chambre, le réseau étant placé au centre de courbure du miroir. Les faisceaux ne traverseraient dans ce cas aucun milieu optique.

(e) *Jumelage de prismes de 30° en quartz et en verre, en montage Littrow* (1)

A chacun des prismes, doit être associée une lentille plan-convexe. Les calculs ont été effectués pour le système suivant, où toutes les indications sont en millimètres. L'instrument complet aurait une longueur d'environ 1.50 mètre.

Partie en quartz (dimensions données en millimètres) :  
 Lentille plan-convexe, épaisseur 6.0, rayon de courbure 555.56, ouverture libre 38;

Distance de la lentille au centre de la plaque : 917.7;

Inclinaison de la plaque 26° 36' ;

Longueur du spectre de  $\lambda$  2000 à  $\lambda$  3700 : 300 mm;

Dimensions du prisme de 30° : hypothénuse 44.8, hauteur 26.8;

Angle d'incidence pour centre du spectre 53° 16' ;

Courbure de la plaque photographique 1806.

Partie en verre :

Verre optique employé pour lentille et prisme : flint dense DF2 (2) ;

Lentille plan convexe, épaisseur 6.0, rayon de courbure 750.8 ouverture libre 47.5;

(1) Le jumelage pourrait évidemment se faire pour des prismes d'un autre angle, par exemple 60°. La plupart des spectrographes Littrow de haute dispersion linéaire utilisent un prisme de 30°.

(2) Indices de réfraction :

$n_D = 1.61700$ ;  $n_C = 1.61216$ ;  $n_F = 1.62801$ ;  $n_e = 1.63923$ .

Dispersion :  $V = 36.6$ .

Distance de la lentille au centre de la plaque : 1183.8;  
 Inclinaison de la plaque : 28° 36' ;  
 Longueur du spectre de  $\lambda$  3600 à  $\lambda$  8600 : 250 mm (avec chassiss de 300 mm, le spectre s'étendrait jusqu'à la limite de l'infrarouge photographique);

Prisme de 30° : hypothénuse 58.1, base 33.6, angle d'incidence pour centre du spectre 54° 42' ;

Courbure de la plaque photographique 2017.

Comme il résulte des calculs trigonométriques par tracés de rayon, la définition d'un tel instrument serait excellente. Le diamètre D du cercle de confusion dans la surface focale serait

|                     |                 |     |            |
|---------------------|-----------------|-----|------------|
| Système en quartz : | $\lambda$ 2000, | D = | 31 $\mu$ ; |
|                     | 2463,           |     | 9 $\mu$ ;  |
|                     | 3700,           |     | 39 $\mu$ ; |
| Système en verre :  | $\lambda$ 4047, |     | 17 $\mu$ ; |
|                     | 4683,           |     | 11 $\mu$ ; |
|                     | 7665,           |     | 15 $\mu$ . |

La dispersion linéaire serait la suivante :

| Système en quartz |                     | Système en verre |                     |
|-------------------|---------------------|------------------|---------------------|
| $\lambda$         | Dispersion linéaire | $\lambda$        | Dispersion linéaire |
| 2000              | 2.9 A/mm            | 3625             | 6.8 A/mm            |
| 2225              | 3.4                 | 4125             | 8.6                 |
| 2463 (axe)        | 4.2                 | 4708 (axe)       | 12.9                |
| 3000              | 7.6                 | 5175             | 17.4                |
| 3700              | 17.0                | 6975             | 41.2                |
|                   |                     | 7600             | 48.4                |

Un autre exemple intéressant de « Littrow jumelé » a été calculé. Il s'agit d'un spectrographe de forme cylindrique de très petite dimension, couvrant le domaine de 2000 à 7000 A; à l'origine, l'instrument était destiné à des analyses souterraines en connexion avec des percements pétrolifères. Deux lentilles d'environ 55 cm de distance focale, combinées avec deux prismes de 30°, l'un en quartz, l'autre en verre, fournissent deux

spectrogrammes d'environ 15 centimètres de longueur, l'un couvrant de  $\lambda$  2000 à  $\lambda$  3700, l'autre de  $\lambda$  3500 à  $\lambda$  7000.

*Remarque au sujet de la conversion d'un montage Littrow en un montage Wadsworth dans un spectromètre infrarouge*

Il peut être utile de remplacer un système de Littrow par un montage de miroir de Wadsworth <sup>(1)</sup> dans l'infrarouge afin de réduire la quantité de lumière diffusée et d'accroître l'énergie, notamment dans les régions spectrales où la matière dispersive devient fortement absorbante. Le miroir placé derrière le ou les prismes de NaCl (ou KBr ou LiF) doit être agencé de manière à pouvoir être pivoté soit en position Littrow, soit en position Wadsworth. En montage Wadsworth, le spectromètre infrarouge requiert un miroir de focalisation du spectre <sup>(2)</sup>. Ce miroir peut avoir une distance focale beaucoup plus petite que celle du collimateur, de façon à accroître la luminosité de l'instrument.

Institut d'Astrophysique  
Février 1950.

<sup>(1)</sup> Ne pas confondre avec le montage de réseau du type Wadsworth envisagé précédemment dans ce travail.

<sup>(2)</sup> Dans le montage Littrow, le miroir collimateur sert à focaliser le spectre.



54191 B  
(20)