Annales de la faculté des sciences de Toulouse

H. Bouasse

Études des actions photographiques

Annales de la faculté des sciences de Toulouse 1re série, tome 8, nº 2 (1894), p. F1-F32
<http://www.numdam.org/item?id=AFST_1894_1_8_2_F1_0>

ÉTUDE

DES

ACTIONS PHOTOGRAPHIQUES,

PAR H. BOUASSE,

Maître de Conférences à la Faculté des Sciences de Toulouse.

PREMIÈRE PARTIE.

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE [1].

On s'est proposé l'étude des lois qui régissent les phénomènes photographiques. On a choisi, pour les soumettre à l'action de la lumière, les plaques photographiques du commerce, bien qu'elles soient de composition complexe et mal définie. On y a trouvé l'avantage d'avoir à sa disposition des plaques aussi identiques que possible entre elles, ce qui ne veut pas dire qu'elles le soient, et d'un emploi facile. Comme on cherchait non pas des lois numériques, mais la forme des équations différentielles qui peuvent représenter les phénomènes, il importait peu qu'on agît sur des corps plus ou moins simples; l'inverse était même préférable, en ce sens que les équations générales se trouvaient mieux déterminées que si le phénomène eût été plus simple.

On a choisi comme dimensions des glaces le format dit quart de plaque 9/13. On les coupe au diamant dans l'obscurité presque complète et on les réduit au format $6\frac{1}{2}/9$; on les conserve dans des boîtes à rainures à double fond. Les expériences les plus grossières montrant que deux plaques n'ont pas des sensibilités comparables, il faut juxtaposer sur la même plaque les épreuves à comparer. Aussi la pose se fait dans une petite chambre en laiton fermée par un couvercle en laiton et dont le fond est percé d'un trou de $1/4^{cm}$. Le cliché est supporté par une glissière mue de l'extérieur par un

(1) Qu'il me soit permis de remercier M. Paraf, Maître de Conférences à la Faculté des Sciences, des conseils qu'il m'a donnés.

tirant dont la tête se déplace sur une échelle en centimètres. On peut ainsi amener devant la fenêtre les divers points du cliché et obtenir une série d'épreuves *équidistantes*. Ces épreuves sont au nombre de 7 par cliché. Un petit volet à glissière en laiton permet de fermer à volonté la fenêtre. Une douzaine de plaques donne 168 épreuves. Les résultats qui suivent sont déduits de la discussion de plus de 3000 épreuves.

Quand il y avait intérêt à supprimer le halo photographique, on usait de l'artifice suivant. On noircit avec du vernis noir (noir de fumée dans du vernis copal à l'alcool) du papier-calque fin; on le découpe une fois sec en rectangles de $5/7^{cm}$. Au moment d'utiliser les clichés, on applique derrière avec de l'huile un de ces papiers. En revenant dans la chambre noire, on enlève le papier et l'on essuie avec un chiffon. Le vernis n'étant pas soluble dans l'huile, le même papier peut servir plusieurs fois et l'on ne risque pas de salir les clichés, ni ses appareils ni ses doigts.

Quand on ne veut pas chercher de lois numériques (et nous verrons que cette recherche est ici complètement illusoire), il importe peu qu'on se serve de tel ou tel développement; il suffit que ce développement soit assez lent pour que sa durée soit exactement connue, 3^m à 4^m par exemple. On la mesure avec un métronome. Elle sera la même pour toute une série de clichés. Les dosages se feront avec le plus d'exactitude possible et l'on choisira les formules les plus simples parmi celles qui sont proposées dans les livres.

Les clichés doivent baigner largement dans le développateur. Le contact de l'air a une influence manifeste et accélère le développement (1).

On fixe à l'hyposulfite et on lave à grande eau. Les liquides ne servent qu'une fois.

Les manipulations de développement se font dans une obscurité complète.

Définition et mesure des noirs d'un cliché.

L'opacité d'un cliché est mesurée par le rapport des intensités d'un fais-

---

(1) C'est au point qu'un cliché qui reste 4 minutes dans le développement est beaucoup moins noir qu'un autre qui pendant le même temps est enlevé toutes les 40 secondes et laissé pendant 20 secondes à égoutter à l'air. Il ne faut donc pas agiter les clichés dans leurs bains, car on risque de découvrir plus ou moins les bords qui deviennent beaucoup plus noirs.

ceau avant et après son passage à travers lui. Il serait peu précis et d'ailleurs inutile de le comparer à une échelle de noirs obtenue sur papier.

Le cliché développé est absorbant même aux points où il n'a pas posé. Soient I le faisceau incident, I_1 l'intensité transmise aux points de pose nulle, I_2 l'intensité en un autre point où l'action lumineuse n'a pas été nulle, le noir de ce point est arbitrairement défini par le rapport $I_1/I_2 - 1 = N$. Soit I_3 l'intensité transmise à travers le verre dépouillé de sa gélatine, le nombre $I_3/I_1 - 1 = V$ donne une idée nette du voile du cliché : on doit tâcher à ce qu'il soit voisin de o. L'unité avec laquelle on mesure les intensités est arbitraire.

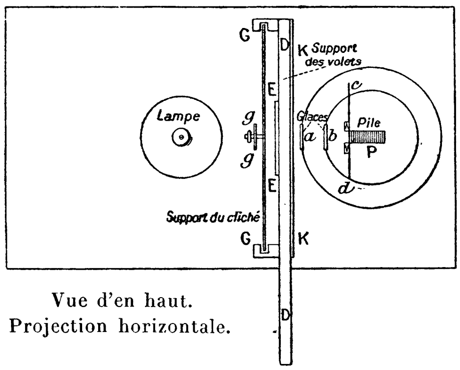
Si le cliché développé se conduisait comme une lame absorbante homogène, le noir dépendrait de la composition du faisceau employé, de sa longueur d'onde s'il est monochromatique. L'observation microscopique apprend qu'il n'en est pas ainsi; avec un fort grossissement il apparaît comme granuleux, tel qu'un écran percé de trous. Comme les grains plus ou moins gros sont opaques, le noir est indépendant de la composition du faisceau employé.

Or la seule mesure photométrique précise se fait avec la pile thermo-électrique et les rayons calorifiques. On se sert donc d'une pile et d'une source calorifique dont on n'utilise que la chaleur la plus réfrangible. Car les couches sensibles sont étalées sur du verre qui absorbe énergiquement les chaleurs obscures : si l'épaisseur du verre varie, on ne mesure plus qu'un effet complexe dû aux variations du noir et de l'épaisseur du cliché. Pour annuler l'effet de ces dernières radiations, le faisceau traverse, outre le verre de la lampe, source de chaleur et le cliché, deux lames de verre, soit en tout à peu près 5^{mm} de verre, devant lesquels une variation d'épaisseur du cliché certainement inférieure à $0^{mm},1$ est insignifiante.

La source de chaleur doit être constante. On emploie une lampe à pétrole à mèche circulaire de 15^{mm} de diamètre; le niveau y est maintenu invariable à l'aide d'un vase de Mariotte. La constance de la lampe est sûre à 1/150 près pendant les 5 minutes que dure l'examen d'un cliché, pourvu que la mèche se roussisse seulement sans se carboniser. On obtient ce résultat en donnant à la flamme depuis la mèche jusqu'aux pointes extrêmes une hauteur inférieure à 3^{cm}. Si la hauteur est plus grande, l'intensité croît rapidement depuis l'allumage, puis décroît indéfiniment et assez vite. Car l'alimentation est insuffisante, la mèche se carbonise et l'arrivée du pétrole est entravée. Il en va de même avec une flamme basse, mais les variations sont alors très lentes et régulières.

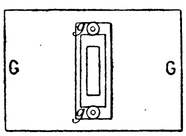
La pile thermoélectrique (bismuth antimoine) est disposée dans une double enceinte en fer-blanc composée de deux boîtes cylindriques, à couvercles, soudées solidement l'une dans l'autre. L'ensemble est fixé sur un banc TT′ (*fig.* 1, 2, 3). Ces boîtes ont 20^{cm} et 16^{cm} de hauteur et laissent

Fig. 1. — Appareil pour la détermination des noirs.



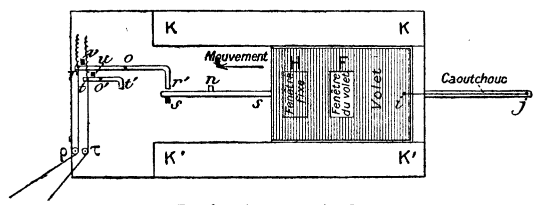
Vue d'en haut.
Projection horizontale.

Fig. 2.



Projection verticale.

Fig. 3.



Projection verticale.

entre elles un espace cylindrique large de 3^{cm}. On y a percé deux fenêtres *a* et *b* de $2/4^{cm}$, fermées par deux lames de verre mastiquées. La pile est soutenue par une plaque verticale de cuivre *cd*, soudée dans la boîte intérieure et percée d'une ouverture rectangulaire où la pile rentre exactement. Elle est ainsi garantie contre les courants d'air et les changements brusques de température, par la forme de l'enceinte et sa grande capacité calorifique; contre la chaleur obscure rayonnante par les lamelles de verre *a* et *b*. D'ailleurs l'équilibre de température de la pile et de l'enceinte est obtenu rapidement, puisque la monture de la pile s'applique directement sur la pièce de cuivre *cd*; les mesures peuvent se suivre à peu d'intervalle.

La flamme de la lampe est éloignée de 16^{cm} à 18^{cm} de la face antérieure de la pile; il ne s'agit donc plus que d'interposer entre la flamme et la pile les clichés à étudier. Or la pile peut s'employer de deux manières : soit en attendant qu'elle ait atteint son état d'équilibre et en mesurant le courant constant produit; soit en mesurant l'arc de première impulsion à l'aide d'un galvanomètre balistique. Dans les deux cas, la quantité mesurée est proportionnelle à l'intensité. On doit choisir la seconde méthode, d'ailleurs généralement beaucoup plus sensible, parce que, les expériences étant plus rapides, on se met à l'abri des changements d'intensité de la lampe, de direction ou d'intensité du champ terrestre et des causes de refroidissement. Il faut donc pouvoir exposer brusquement la pile au faisceau et, l'impulsion lue, intercepter le faisceau pour éviter un échauffement qui prolongerait inutilement les expériences.

De ces conditions résultent les dispositions suivantes : en DD′ se trouve une planche verticale épaisse, solidement fixée au banc TT′, percée d'une fenêtre H de $2/4^{cm}$, qu'un volet EE′ permet d'ouvrir et de fermer à la main. En GG′ une planche de bois mince, percée d'une fenêtre de $0,5/3^{cm}$ et sur laquelle on disposera le cliché, est guidée par des coulisses. Le cliché est maintenu par une lame de bois gg', percée d'une fenêtre de $2/4^{cm}$, qui peut être serrée contre GG′ par deux écrous en cuivre. Les épreuves des clichés, ayant $1/4^{cm}$, débordent la fenêtre percée dans GG; on les dispose bien symétriquement par rapport à elle.

En avant de la planche DD′ se trouve le volet destiné à ouvrir et fermer brusquement la fenêtre H de la planche DD′. C'est une planche mince MM′ percée d'une fenêtre F de $2/4^{cm}$. Sous l'action d'un caoutchouc ij, elle bute contre un arrêt J; la fenêtre H est alors fermée. La planche MM′ porte une tige de cuivre ss sur laquelle est soudé l'arrêt n. Les extrémités t' et r' de deux leviers horizontaux tournant autour des points O et O′ sont maintenus par des ressorts r et t et des butoirs u et v à une petite distance de la tige de cuivre. Tirant le volet vers la gauche tout en appuyant sur les leviers, on amène l'arrêt n à gauche de l'extrémité t'. Si alors on abandonne les leviers puis le volet, n bute sur t', les fenêtres F et H ne sont pas superposées, le faisceau est intercepté. Si l'on tire la corde $t\tau$, le volet est attiré brusquement vers la droite; l'arrêt n bute contre l'extrémité r', le faisceau passe. Pour l'intercepter de nouveau, la déviation lue, on tire sur la corde $r\rho$, le volet bute contre J.

La durée d'exposition est à peu près égale à la durée d'un quart d'oscillation de l'aiguille du galvanomètre, soit cinq à six secondes. Au bout d'une vingtaine de secondes, la pile est suffisamment refroidie pour qu'on puisse recommencer. Le galvanomètre balistique, à deux bobines, possède un gros miroir de $1/2^{cm}$; on lit une échelle en centimètres et millimètres placée à 2^m avec une lunette de théodolite très grossissante; on peut apprécier au vol une déviation de 10^{cm} à $0^{cm},01$ près. L'échelle est éclairée par une lampe à gaz. L'aiguille est ramenée à l'immobilité au moyen de deux solénoïdes placés à des distances différentes et dans lesquels on lance un faible courant. Suivant les effets à produire, on se sert de l'un ou de l'autre.

Homogénéité des plaques du commerce et définition des bains.

Il est nécessaire de savoir si la sensibilité des plaques du commerce est constante ou de quelle manière elle varie d'un point à un autre. On a d'abord développé des plaques qui n'avaient pas été exposées à la lumière dans le laboratoire; toutes l'ont été plus ou moins chez le fabricant. Le noir n'est pas nul ni partout le même. Que le cliché ait effectivement vu le jour ou que la couche sensible soit déjà réductible par le développement sans action préalable de la lumière, cette expérience montre que le cliché n'est pas homogène, puisque sa sensibilité varie d'un point à un autre. Il est donc inutile de chercher une méthode qui permette de déduire le rapport d'intensité de deux lumières de la relation qui peut exister entre les deux noirs obtenus en deux points d'un même cliché, quels que soient la durée des poses et les développements employés. Pour la même raison, on ne peut chercher à conclure directement les lois de l'action de la lumière sur les plaques des noirs isolément obtenus en divers points de cette plaque.

Que les plaques non posées se voilent dans des développements un peu actifs, c'est un fait d'expérience journalière; mais, dans la pratique de la Photographie, on n'y prend pas garde, parce que le voile est encadré par des parties plus sombres et paraît moins opaque par contraste. Ce qui montre plus nettement l'importance de ce voile, c'est qu'un positif sur plaque est beaucoup plus uniformément gris que le négatif générateur. L'intensité de ce voile V est généralement comprise entre 0 et 0,5.

L'effet de ce noir, s'il était uniforme, serait celui d'un verre interposé plus ou moins opaque, et il n'en résulterait pas une impossibilité de relier l'intensité au noir. Mais soient V_1 et V_0 les voiles maximum et minimum d'un cliché; calculons $V_1 - V_0$. On trouve ainsi des nombres très souvent de l'ordre de 0,1 et qui, parfois, atteignent des valeurs énormes supérieures à 0,2, même dans les clichés les plus beaux, ceux pour lesquels la courbe des noirs est la plus régulière. On ne peut invoquer, pour appliquer ce fait, les inégalités de la pose, puisqu'elle est nulle, et les autres causes d'erreurs ont été soigneusement écartées.

Les clichés qui ont servi aux précédentes expériences sont des plaques très sensibles (Lumière marque bleue), ayant subi la maturation et d'un grain assez grossier : les particules d'argent réduit peuvent avoir de 6μ à 10μ. Mais les clichés d'un grain plus fin présentent des irrégularités aussi fortes que l'on peut attribuer aux irrégularités d'étendage et de séchage.

Continuité dans la sensibilité des plaques.

Si les plaques au gélatinobromure, dans l'état actuel de leur fabrication, ne peuvent servir comme photomètres, il reste à savoir si elles ne fourniraient pas une méthode exacte pour déterminer non plus généralement le rapport, mais l'égalité de deux actions. Déterminons pour les sept épreuves, supposées obtenues avec la même intensité et la même pose, les déviations au galvanomètre qui mesurent les intensités transmises avec une unité arbitraire. Prenons sur un axe des points équidistants $x_0, \ldots, x_6$ et élevons des ordonnées $y_0, \ldots y_6$ proportionnelles aux déviations : la courbe qui passe par l'extrémité des ordonnées est plus ou moins sinueuse. Elle rentre dans deux types : c'est soit une parabole, soit une portion de courbe du 3^e degré présentant un point d'inflexion; dans le premier cas, la sensibilité présente un minimum ou un maximum du milieu; dans le second, elle varie dans le même sens d'un bout à l'autre.

Par les quatre ordonnées y_0, y_2, y_4, y_6 menons une parabole cubique $y = A + Bx + Cx^2 + Dx^3$. L'expérience montre qu'elle passe très sensiblement par les points y_1, y_3, y_5. Soit y'_1, y'_3, y'_5 les valeurs calculées. Posons

$$\varepsilon_1 = y_1 - y'_1, \qquad \ldots, \qquad 3\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3, \qquad 3[\varepsilon] = [\varepsilon_1] + [\varepsilon_2] + [\varepsilon_3],$$

le symbole [ ] désignant la valeur absolue. La précision avec laquelle la courbe calculée passe par les points observés est mesurée par les deux quantités

$$\rho = \frac{3\varepsilon}{y'_1 + y'_2 + y'_3}, \qquad [\rho] = \frac{3[\varepsilon]}{y'_1 + y'_2 + y'_3}.$$

L'expérience montre que, si les intensités et les temps de pose sont égaux pour les épreuves, ou même si les intensités varient d'une manière quelconque, pourvu qu'elle soit lente et continue, les valeurs de ρ sont inférieures à 0,01 et qu'elles sont indifféremment positives ou négatives, tandis que les noirs peuvent être d'un bout à l'autre assez différents. Les valeurs de $[\rho]$ ne sont guère plus grandes, ce qui prouve que les ε sont séparément petits. Soient N_1 et N_0 les noirs maximum et minimum; posons $N_1/N_0 = 1 + \alpha$; voici les résultats pour une série de clichés :

Développement à l'acide pyrogallique.			Développement au fer.		
α.	ρ.	$[\rho]$.	α.	ρ.	$[\rho]$.
Plaques sensibles.			Plaques peu sensibles.		
0,22	+ 0,0044	0,023	0,22	0,0056	0,0056
0,12	— 0,0039	0,014	0,47	0,0109	0,0109
0,08	— 0,011	0,011	0,68	0,0092	0,024
0,024	— 0,0043	0,010	0,51	0,045	0,045
0,024	+ 0,0052	0,0052			
0,15	+ 0,012	0,018	Plaques sensibles.		
0,15	+ 0,0002	0,0094	0,03	— 0,0046	0,01
0,13	— 0,0078	0,0078	0,012	— 0,0041	0,005
0,18	+ 0,017	0,017	0,10	+ 0,00044	0,091
0,25	+ 0,0011	0,014	0,17	— 0,00061	0,019
0,23	+ 0,0028	0,0064	0,04	— 0,0092	0,011
0,09	— 0,0028	0,0070	0,25	+ 0,0107	0,0107

Moyenne générale.............. $\rho = 0,0013$.

Méthode photométrique.

Des résultats précédents résulte une méthode pour déterminer si deux faisceaux sont égaux ou non. Soit une lampe dont l'intensité varie d'une manière continue avec le temps, mais très lentement. Un faisceau de lumière provenant de cette lampe est modifiée successivement par deux phénomènes différents I et II; on se propose de déterminer si les faisceaux ainsi modifiés sont égaux ou inégaux. Des sept épreuves que porte un cliché, on fait les n^{os} 0, 2, 4, 6 avec le phénomène I, les n^{os} 1, 3, 5 avec le phénomène II, avec le même temps de pose, dans l'ordre de leurs numéros et sensiblement à des intervalles de temps égaux. On conduit une parabole cubique par les ordonnées y_0, y_2, y_4, y_6, on calcule la valeur de ρ. Si elle est plus petite que la limite inférieure ordinaire des ρ, les faisceaux peuvent être considérés comme également modifiés; sinon le signe de ρ donne le sens de l'inégalité.

Généralisation de la méthode.

Supposons que, les ordonnées y_0, y_2, y_4, y_6 ayant été obtenues à l'aide d'une action lumineuse déterminée I, les ordonnées y_1, y_3, y_5 proviennent de trois actions II, III, IV. On calculera les valeurs

$$R_1 = 1 + \rho_1 = y_1/y'_1, \qquad R_3 = 1 + \rho_3 = y_3/y'_3, \qquad R_5 = 1 + \rho_5 = y_5/y'_5.$$

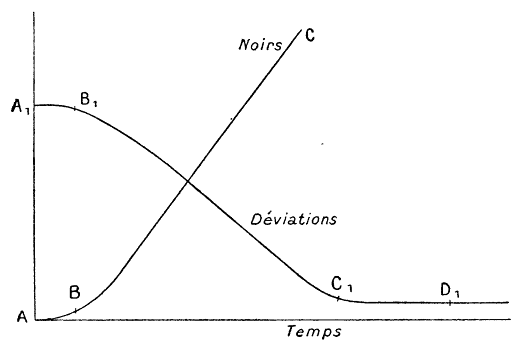
On a ainsi trois nombres R_1, R_3, R_5 qui sont, à très peu près, proportionnels aux intensités II, III et IV. Ces nombres ne sont pas complètement comparables, puisqu'ils ont été obtenus pour des points de sensibilités différentes. Il suffit pourtant d'admettre que, lorsque la sensibilité n'est pas constante, tous les noirs qui seraient obtenus en un point avec diverses intensités, pourvu qu'ils ne diffèrent pas trop, sont multipliés par un certain facteur constant ne dépendant que de la position du point, pour que les trois nombres R_1, R_3, R_5 aient des valeurs identiques à celles qu'on obtiendrait avec un cliché rigoureusement homogène.

Action de la lumière sur les plaques.

I. *Influence de l'époque du développement sur le noir obtenu.* — Il est presque impossible de décider si une plaque est plus ou moins noire suivant qu'elle est développée aussitôt après la pose ou plusieurs mois après. Cela provient de la difficulté qu'il y a d'obtenir deux bains de développement rigoureusement comparables. En effet, si l'on choisit le mieux déterminé de ces développements, l'oxalate de fer, on constate que son activité varie depuis les premiers instants de sa préparation et diminue lentement, mais pour ainsi dire indéfiniment, pourvu que l'on empêche toute précipitation par une addition suffisante d'acide tartrique. Il y a d'ailleurs un changement de couleur, le rouge devient plus foncé, et ce changement est la preuve d'une modification dans la composition chimique. On ne serait jamais sûr d'opérer dans les deux cas, strictement dans les mêmes conditions, et l'expérience serait si compliquée, qu'elle ne serait pas concluante. On sait toutefois, par une expérience de tous les jours, qu'à supposer même que l'image s'efface peu à peu, c'est avec une lenteur certainement extrême. On peut donc admettre que l'influence de l'époque du développement sur le noir est nulle.

II. *Courbe des noirs en fonction du temps de pose pour une intensité constante.* — L'expérience montre que la courbe des noirs part de la valeur o (*fig.* 4), pour une pose nulle (cela par définition). Sa concavité est

Fig. 4.



d'abord tournée vers l'axe des noirs; la tangente à l'origine est sinon horizontale, ce dont l'expérience ne peut guère décider, du moins, fort peu inclinée sur l'axe des temps. Elle devient rapidement rectiligne et tend enfin à s'infléchir vers l'axe des temps.

Si, toujours en fonction du temps et pour une intensité constante, on représente non plus les noirs, mais les déviations directement observées au galvanomètre, on trouve une courbe $A_1B_1C_1D_1$ qui présente nettement une partie $A_1\,B_1$ presque horizontale correspondant aux premiers instants. Suivant que la portion $C_1\,D_1$ est asymptote à l'axe des temps ou à une parallèle à cette axe, la courbe des noirs continue à monter vers les noirs infinis ou s'infléchit vers une asymptote horizontale. Il est bien difficile de trancher la question, puisque les moindres trous dans la gélatine, tout en modifiant très peu la courbe $C_1\,D_1$, changent du tout au tout la partie correspondante de la courbe des noirs.

Ce n'est là que la partie de la courbe des noirs voisine de l'origine. Que les noirs augmentent sans cesse, ou qu'ils semblent avoir une asymptote horizontale, la plaque ne prend pas un état définitif. En général, le noir décroît ensuite pour des poses beaucoup plus longues, comme nous le verrons en parlant du renversement.

III. *Courbe des noirs en fonction de l'intensité pour des temps de pose constants.* — On peut se proposer de déterminer pour un temps de pose donné la courbe des noirs en fonction des intensités supposées constantes tout le temps de la pose. Les courbes obtenues ont absolument l'aspect des précédentes; et l'on peut faire à leur sujet les mêmes remarques qui ont été présentées pour le cas précédent, à la condition qu'on reste dans des limites de pose et d'intensité telles que le phénomène du renversement ne se produise pas.

Problème de la Photographie pratique. Étude générale des développements.

Le problème ordinaire de la Photographie est excessivement compliqué; nous allons l'envisager d'une manière tout à fait générale. Soit donc le cas d'un éclairage constant, avec une lumière de composition bien déterminée; la pose est supposée constante, et seules les intensités sont variables. C'est bien le cas pratique de la Photographie, à la condition d'admettre qu'un objet coloré a la même action qu'un objet blanc moins éclairé. A l'aide des courbes déjà obtenues, construisons pour un développement déterminé A, agissant pendant le temps t_1, la courbe des rapports des inverses des déviations galvanométriques (*voir* page F.3), $O = N + 1$, en fonction de l'intensité et discutons les résultats (*fig.* 5).

Tout d'abord, quelle devrait être cette courbe pour qu'un cliché positif obtenu à l'aide d'un négatif et regardé par transparence soit identique pour le rapport des teintes à l'objet primitivement photographié? A chaque intensité I de l'objet correspond une opacité du cliché telle que d'un faisceau I_0 incident une fraction $I_1 = I_0 \varphi(I)$ soit seule transmise. Cette lumière fournira un positif à travers lequel un faisceau I'_0 sera transmis dans le rapport

$$I'_1 = I'_0 \varphi(I_1) = I'_0 \varphi[I_0 \varphi(I)].$$

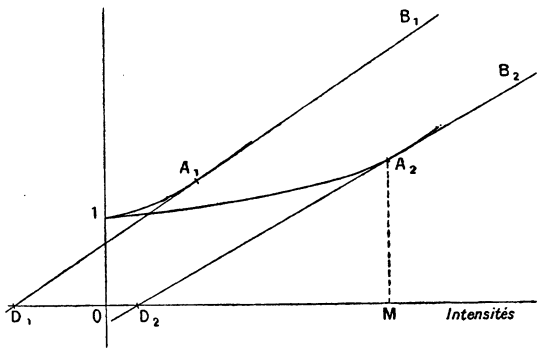
Cherchons quelle doit être la signification du symbole φ pour que l'on ait

$I'_1 = KI$, K étant une constante. Il suffit de résoudre une équation fonctionnelle de la forme $x = \theta[\theta(x)]$. Posons

$$y = \theta(x), \quad \text{d'où} \quad x = \theta(y).$$

Toute équation symétrique en x et y résolue par rapport à y donne une so-

Fig. 5.



lution; on vérifiera que la fonction $xy = C$ est la seule admissible parmi celles où x et y n'entrent qu'au premier degré. Si donc le positif était identique aux objets pour le rapport des teintes, c'est qu'il y aurait proportionnalité entre les intensités et les quantités $O = N + 1$; la courbe dont nous discutons la forme serait une droite passant par l'origine des coordonnées $O = aI$. La courbe expérimentalement trouvée part au contraire par définition de l'ordonnée 1, puisque N part de l'ordonnée o et ne devient pratiquement une droite qu'après une portion courbe 1 A plus ou moins longue, qui présente sa concavité vers le haut. Le positif sur plaque vu par transparence n'a donc généralement pas les mêmes rapports d'intensités que l'objet primitif.

Cherchons à quelles conditions les tons y seront plus ou moins tranchés que dans l'objet. Soient deux rapports O et $O + dO$ correspondant aux intensités I et $I + dI$. Les teintes sont plus ou moins tranchées, le cliché est plus brutal ou plus gris que l'objet, suivant que l'on a

$$dO/O \gtrless dI/I.$$

Posons

$$K dO/O = dI/I.$$

Le coefficient K mesure l'uniformité du cliché. Soit $O = aI + b$ l'équation de la tangente, il vient $K = 1 + \frac{b}{aI}$; pour que le cliché soit dur et tranché, K doit être aussi petit que possible; donc la tangente doit couper l'axe des abscisses en avant de l'origine et le plus loin possible.

De cette condition, il résulte que, pour de faibles intensités et quels que soient les développements et leur durée d'action, les clichés sont toujours gris. Il résulte de plus cette proposition expérimentale, qu'un développement peut être moins énergique qu'un autre, et donner des oppositions plus nettes. Le développement $1A_1B_1$ est plus énergique que $1A_2B_2$, mais pour des intensités égales entre elles et supérieures à OM le second développement donne des effets plus durs que le premier. C'est précisément l'effet qu'on obtient en additionnant un développement de bromure de potassium; plus on augmente la quantité de ce dernier sel, plus s'abaisse la courbe $1AB$; ce qu'on trouve exprimé dans les traités de Photographie sous cette forme absolument défectueuse, que le bromure est un retardateur, mais plus aussi s'avance le point D vers la droite; les oppositions sont de plus en plus brutales. Aussi en recommande-t-on l'emploi lorsque les clichés sont supposés devoir être trop uniformes.

A chaque développement de composition déterminée correspondent une infinité de courbes analogues aux précédentes, une pour chaque durée de développement. On conçoit que l'on puisse obtenir à peu près tels effets que l'on désire en sachant s'y prendre. Et réciproquement, de la discussion des règles consacrées par l'usage, on peut déduire des remarques intéressantes sur la nature des courbes.

Ainsi, il importe beaucoup de distinguer entre diminuer l'activité d'un bain, soit en ajoutant simplement de l'eau, soit en l'additionnant de bromure de potassium; dans le second cas, nous avons vu le point D s'avancer vers la droite, et par conséquent les oppositions s'exagérer. Dans le premier, le point D marche vers la gauche, le cliché devient plus uniforme. En général, les tangentes rencontrent l'axe des noirs à gauche de l'origine, c'est-à-dire que le rapport des intensités transmises est plus voisin de 1 que n'est le rapport des intensités dans l'objet photographié.

Nous pouvons maintenant revenir sur ce qui a été dit page F.9 de la méthode photométrique; car, pour avoir une idée exacte de sa sensibilité, il fallait connaître la courbe des noirs, ou, ce qui revient au même, la courbe $1A_1B_1$ qui représente la quantité O. Soit donc connue la forme de cette courbe pour un certain développement agissant pendant un temps t_1.

La déviation galvanométrique y est, à un facteur constant près, l'inverse de O. On a donc

$$\Delta y/y = -\Delta O/O = \rho,$$

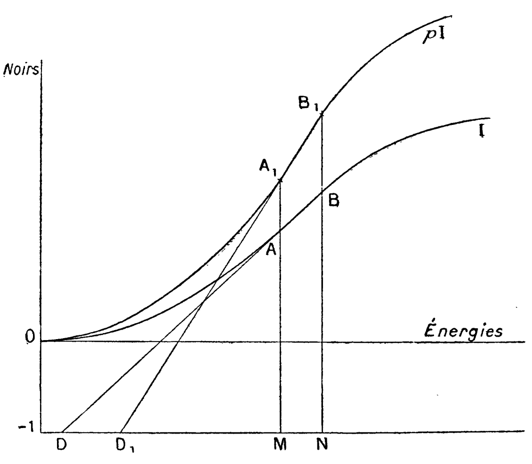
d'après nos notations. Mais $d\mathrm{I}/\mathrm{I}$ représente l'erreur relative sur la mesure des intensités et l'on a

$$d\mathrm{I}/\mathrm{I} = \mathrm{K}\, d\mathrm{O}/\mathrm{O} = -\mathrm{K}\rho.$$

Soit $\mathrm{O} = a\mathrm{I} + b$ l'équation de la tangente; l'erreur a pour expression $-\rho(1 + b/a\mathrm{I})$. Les valeurs de ρ sont largement indépendantes du noir et voisines de 0,01; il faut rendre minimum le second facteur. Il résulte de là plusieurs conséquences. Il faut d'abord faire en sorte, en disposant des intensités et des temps de pose à comparer, que les noirs ne correspondent pas à la partie $1\mathrm{A}_1$ de la courbe; de plus, le développement doit être choisi tel qu'il puisse donner des valeurs négatives de b; l'erreur relative sur les intensités à comparer sera généralement un peu supérieure à 0,01, mais très près de lui être égale.

IV. Soit I l'intensité lumineuse, exprimée en fonction des temps. Le noir est-il fonction de l'intégrale $\int_0^{t_1} \mathrm{I}\, dt$, dans laquelle t_1 est la durée to-

Fig. 6.



tale de pose, ou dépend-il séparément de I et de t? Dans le cas d'une intensité constante, est-il seulement fonction du produit $\mathrm{I}t_1$, c'est-à-dire de la valeur totale d'énergie dépensée, ou dépend-il encore de la manière dont on l'a dépensé? L'affirmative a été souvent admise : on lit, par exemple, dans le *Traité de la lumière* de Becquerel, t. II, p. 115 : « Que cent faisceaux de rayons égaux au premier viennent frapper la matière sensible ensemble ou successivement, elle recevra la même impression, car il se produira la même somme d'action chimique. La substance chimique sensible conserve et accumule l'impression qu'elle reçoit des rayons lumineux ». La même opinion a été soutenue par M. Janssen.

L'expérience répond nettement pour la négative.

Prenons pour abscisses les énergies dépensées, c'est-à-dire les produits It_1; si l'hypothèse précédente était exacte, la courbe des noirs serait unique : soit OAB celle qui correspond à l'intensité constante I; la courbe qui correspond à l'intensité pI, $p > 1$, au lieu de se confondre avec la précédente, est au-dessus. Menons la droite horizontale d'ordonnée -1. Nous désignerons par R le rapport $\frac{MA_1}{MA}$; on a donc, d'après nos notations, $R = 1 + \rho$.

Lorsque le point A se déplace le long de la courbe OAB correspondant à une même intensité I, la valeur du rapport R varie; il est égal à 1, pour des énergies très faibles, quel que soit le nombre p; puis il croît à mesure que le point A se déplace vers la droite. Ainsi pour $p = 60$, on a obtenu suivant le temps de pose, c'est-à-dire suivant la position du point A, des nombres compris entre 1 et 2,64.

On déduira de ce fait les positions relatives des tangentes aux points A et A_1. Si le rapport était constant, les tangentes se rencontreraient au même point D de l'horizontale d'ordonnée -1; au contraire, la tangente en A_1 vient aboutir au point D_1 à droite du point D, où aboutit la tangente en A. D'après ce que nous savons sur la dureté des clichés, le cliché est d'autant plus dur, que l'intensité est plus grande et le temps de pose plus court.

Cette conséquence est bien connue dans la pratique; les clichés obtenus à l'aide d'intensités faibles sont toujours plus ou moins uniformément gris.

V. Dans une première expérience, la fonction $I = f(t)$ se compose de portions quelconques où l'intensité n'est pas nulle, séparées par des intervalles suffisamment longs où elle est nulle. On intervertit les portions où I n'est pas nul. Le noir reste-t-il le même?

Comme cas particulier, on peut supposer I constant.

Pour répondre à la question posée, on a dépensé successivement en un même point deux quantités d'énergies, l'une avec l'intensité 60, l'autre avec l'intensité 1. On a comparé les résultats obtenus en commençant par l'intensité 60, puis en commençant par l'intensité 1. Les premières épreuves ont été plus noires; on a trouvé $\rho = 0{,}263$. D'autres épreuves moins noires ont donné $\rho = 0{,}105$. Ces résultats prouvent qu'une intensité trop faible pour avoir une action sensible sur un cliché non impressionné ou peu impressionné a une action sensible, si elle agit après une intensité plus forte. On sait que M. Becquerel a classé les rayons en rayons actifs et rayons continuateurs, ces derniers n'agissant que sur une plaque déjà impressionnée. On voit, d'après ces expériences, qu'une telle distinction est inutile, tous les rayons jouant le rôle de rayons continuateurs. Les rayons rouges, étant ordinairement peu actifs, n'auront une action sensible que s'ils viennent après d'autres rayons.

Roue dentée.

Étude de la loi d'intensité d'un faisceau émis par une source constante et traversant une roue dentée tournant dans son plan. — Soit une source de surface quelconque S située dans le plan P; elle envoie, par

Fig. 7.

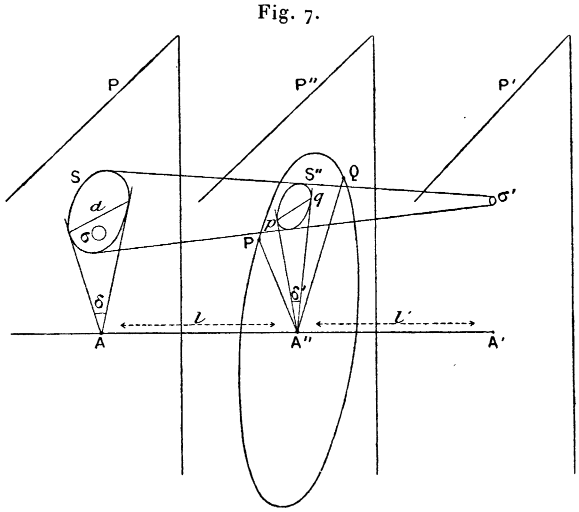
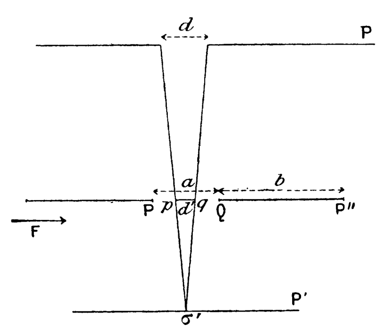


Fig. 8.



unité de surface, une quantité e d'énergie sur chaque unité de surface du plan P′ où se trouve le cliché. La lumière est interrompue par une roue dentée tournant dans le plan P″ autour de la droite AA′ perpendiculaire aux plans PP′P″. La distance de l'axe aux éléments des plans PP′P″, qu'il y aura lieu de considérer, est assez grande pour qu'on la puisse considérer comme constante et égale à R. Les dents de la roue sont des secteurs vides d'angle α, séparés par des secteurs pleins d'angle β; elle fait n tours par seconde.

La lumière qui va d'un élément σ de la source à un élément σ' du plan P est interrompue un temps $\beta/2\pi n$ et passe un temps $\alpha/2\pi n$. La quantité d'énergie reçue par σ' venant de σ est, par seconde sans la roue, $e\sigma\sigma'$, avec la roue, $e\sigma\sigma'\alpha/(\alpha+\beta)$, quelles que soient la position de la roue et sa vitesse. Or, l'élément σ' reçoit séparément autant d'énergie de chaque élément σ; l'intensité totale étant la somme arithmétique des intensités, l'intensité reçue par unité de temps par l'élément σ' est $\sigma' e\alpha \mathrm{S}/(\alpha+\beta)$, quantité indépendante de la vitesse et de la position de la vue. Nous avons donc, avec la roue, un moyen de déverser une quantité d'énergie constante, tout en modifiant la répartition dans le temps.

Étudions cette répartition. Soient l la distance des plans PP″, l' celle des plans P″P′. Avec l'élément σ' comme sommet, décrivons le cône ayant pour directrice la courbe limitant S; soit s' l'aire de la section de ce cône par le plan P″. Des points A et A″ menons des tangentes aux courbes S et S′; soient δ et δ' les angles qu'elles comprennent. Posons $d=\delta \mathrm{R}$, $d'=\delta' \mathrm{R}$ et, pour simplifier, représentons le plan qui passe par les droites d, d' et l'élément σ'. La largeur des pleins de la roue y sont $a=\alpha \mathrm{R}$ et celle des vides $b=\beta \mathrm{R}$.

Tant que les dents laissent intacte la surface S′, la lumière reçue par l'élément σ' est constante et égale à $e\mathrm{S}\sigma'$; si elles en recouvrent une fraction $(1-m)\mathrm{S}'$, l'intensité est $e\mathrm{S}\sigma' m$; soit $a>d$; déterminons la loi qui relie au temps le coefficient m.

L'intensité est constante depuis l'instant (la roue tournant dans le sens de la flèche) où le rayon A″Q dépasse A″q, jusqu'à celui où A″P atteint A″p, c'est-à-dire pendant le temps θ nécessaire à la roue pour tourner d'un angle $\alpha-\delta'$, soit

$$\theta=(\alpha-\delta')/2\pi n=(a-d')/2\pi n \mathrm{R}.$$

Comme $d'=al'/(l+l')$, on a

$$\theta=[a-dl'/(l+l')]/2\pi n \mathrm{R}.$$

Avant et après la période constante, il y en a deux d'intensité variable et de durée θ' nécessaire aux rayons A″Q, A″P pour tourner de l'angle $p\mathrm{A}''q = \delta'$, soit

$$\theta = \delta'/2\pi n = dl'/(l + l')\,2\pi n\mathrm{R}.$$

Les durées θ et θ' ne dépendent pas de la forme de la source, mais seulement de l'angle δ'.

L'intensité constante $\mathrm{S}e\sigma'$ est indépendante de la forme de la source; la loi de variation en dépend. Pour la déterminer, on construit une surface semblable à S ou S′ et l'on cherche la loi en fonction du temps des espaces recouverts par un plan limité par une droite et qui se déplace d'un mouvement uniforme parallèlement à lui-même [1].

La position de la roue entre la source et le cliché a une importance capitale. Si $l' = 0$, si la roue est appliquée contre le cliché, $\theta' = 0$; l'intensité passe brusquement de sa valeur maxima, qu'elle conserve un temps $a/2\pi n\mathrm{R}$, à une valeur nulle qu'elle possède un temps $\theta_1 = b/2\pi n\mathrm{R}$. Si $l = 0$, le temps variable θ' est maximum et égal à $d/2\pi n\mathrm{R}$; la distribution de l'énergie se trouve modifiée le plus possible. La période constante dure $(a - d)/2\pi n\mathrm{R}$. Si a est voisin de d, l'éclairage n'est jamais constant. Une intensité constante de durée $a/2\pi n\mathrm{R}$ est remplacée par une intensité variable de durée double.

---

(1) Voici le calcul complet dans le cas d'une source circulaire. Le cercle a pour équation $x^2 + y^2 = 1$, le plan se déplace de gauche à droite parallèlement à l'axe des x, il est limité par une droite parallèle à l'axe des y; la surface recouverte est donnée par l'intégrale $m\pi = 2\int_{-1}^{x} \sqrt{1 - x^2}\,dx$. Posons $x = \sin\varphi$, il vient

$$m\pi = 2\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\varphi} \cos^2\varphi\,d\varphi = \varphi + \frac{\sin 2\varphi}{2} + \frac{\pi}{2}.$$

On a calculé vingt valeurs de l'intégrale.

$x = -0,9$	0,0588	$x = -0,4$	0,7929	$x = 0,1$	1,7705	$x = 0,6$	2,6944
8	0,1635	3	0,9799	2	1,9680	7	2,8461
7	0,2955	2	1,1736	3	2,1617	8	2,9781
6	0,4472	1	1,3711	4	2,3487	9	3,0828
5	0,6142	0	1,5708	5	2,5274	10	1,1416

En construisant la courbe passant par ces points, on trouve qu'elle est presque rigoureusement droite entre $-0,5$ et $0,5$.

Résultats expérimentaux.

VI. *Influence de la vitesse de rotation de la roue.* — Si la vitesse est suffisamment grande, l'expérience montre que le noir en est indépendant. Les expériences ont été faites avec une roue où $\mu = 0,2$; le nombre des pleins ou des vides était de 36; le nombre d'interruptions par minute était voisin soit de 16000, soit de 32000. Les poses avec des intensités différentes variaient de deux à dix minutes. On a trouvé pour ρ les nombres suivants :

$$+0,014, \quad -0,0057, \quad +0,00, \quad -0,011, \quad -0,0057, \quad +0,00, \quad -0,02.$$

Moyenne des valeurs absolues 0,008, moyenne algébrique 0,0041.

Cette moyenne est au-dessous de la limite possible des erreurs d'expérience. Le signe + pour ρ indiquerait une action moindre pour les grandes vitesses.

VII. *Influence de la position de la roue.* — On a donné à la roue deux positions l'une très voisine du cliché, l'autre voisine de la source. Le rapport de la durée de l'éclairage constant à celle de l'éclairage variable était lorsque la roue se trouvait près de la source de 0,88, loin de la source 3,55. Dans le deuxième cas, l'intensité passait très rapidement de sa valeur maxima à une valeur nulle; dans le premier, au contraire, la durée de l'éclairage maximum était très petite par rapport à celle de l'éclairage variable.

On a trouvé pour trois clichés

$$\rho = +0,0066, \qquad +0,0034, \qquad +0,026.$$

Le signe + pour ρ indique une action plus grande lorsque la roue est près de la source, c'est-à-dire lorsque les discontinuités sont moindres.

VIII. *Intensité* 1 *avec la roue, intensité* μ *sans la roue.* — Il s'agit de savoir si les actions sont les mêmes sans la roue et l'intensité μ, avec la roue et l'intensité 1, les poses restant les mêmes. La réponse a été négative. Ces expériences ayant une certaine importance photométrique ont été reprises de plusieurs manières.

a. Obtenons sans la roue, d'abord avec une pose 1 et une intensité I, puis avec une pose μ^{-1} et une intensité μI, mais sur un même cliché, des épreuves dont nous comparerons les noirs comme il a été expliqué page F.8, nous obtiendrons une série de valeurs de R. Obtenons d'abord avec une pose 1 et une intensité I, sans la roue, puis avec une pose μ^{-1} et la même intensité I, mais en interposant la roue, des épreuves caractérisées par des nombres R′ et comparons R et R′. Cette méthode revient à remplacer une diminution d'intensité dans le rapport μ par l'interposition d'une roue où le rapport d'un vide à la largeur d'un plein et d'un vide est μ. On voit l'intérêt qu'il y aurait à ce que l'effet lumineux fût le même. Pour $\mu = 0{,}5$, on a obtenu

R..........	1,012,	1,048,	1,11,	1,12,		
R′.........	1,28,	1,22,	1,29,	1,20,	1,16,	1,11.

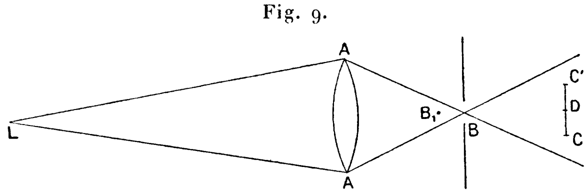
Ces nombres obtenus avec des clichés différents ne sont pas comparables en toute rigueur; cependant on constate que R′ est plus grand que R. La diminution d'action est plus forte quand on réduit l'effet par la roue que lorsqu'on modifie directement l'intensité, tout en conservant dans les deux cas la même somme totale d'énergie dépensée.

b. On a essayé une démonstration plus directe. Obtenons avec une certaine pose constante et sur le même cliché des épreuves, les paires avec l'intensité 1 sans la roue, les impaires avec l'intensité μ^{-1} et la roue. Calculons les nombres R, il vient

$$R = 1{,}0623, \quad 1{,}045, \quad 1{,}075, \quad 1{,}034 \quad \text{pour} \quad \mu = 02.$$

La moyenne des R est 1,0573 nettement au-dessus des erreurs d'expériences; la conclusion est la même que précédemment. Toutefois, on pour-

Fig. 9.



rait douter de l'exactitude de la méthode employée pour diminuer l'intensité dans un rapport donné.

On s'est appuyé pour toutes les expériences précédentes sur la loi du carré des distances appliquée comme suit. En L se trouve une lampe au pétrole dont le liquide est maintenu à un niveau constant par un vase de Mariotte. En AA, à $1^m,50$ de la lampe, une lentille de 5^{cm} de diamètre (qui sous-tend donc à peine un angle de $2°$) et de 13^{cm} de distance focale. En B, au foyer, un écran percé d'un petit trou; en CC′ le cliché. On peut à la rigueur faire à cette méthode les objections suivantes : 1° On compte les distances BD à partir du foyer des rayons lumineux B au lieu de le faire à partir du foyer des rayons chimiques B_1. Les erreurs sont insignifiantes, surtout pour des valeurs de $BD > 30^{cm}$; 2° la lentille déforme les cônes de rayons et donne à des cônes voisins des intensités différentes. Le cliché en se déplaçant est tantôt sur un cône tantôt sur l'autre; 3° les distances du point B aux divers points du cliché ne sont pas les mêmes lorsque BD est petit; elles le deviennent si BD est grand. Comme la distance qui entre dans l'application de la loi du carré des distances est BD, il en résulte une erreur (d'ailleurs très faible). De ces trois causes d'erreur, la première et la troisième sont dans le sens des résultats précédents; elles donneraient des intensités variant moins vite que le carré des distances. La deuxième est purement accidentelle.

c. Pour éviter ces objections, on a changé la méthode de mesure des intensités et employé des nicols. Le faisceau cylindrique émis par la lampe traverse un diaphragme, les nicols dont l'un est monté sur un cercle gradué et deux lentilles qui l'étalent. Les nicols ne déviaient pas la lumière, ce qui est d'une importance extrême pour la précision des expériences.

Voici les résultats pour huit clichés :

$$R = +1,028, \quad +1,083, \quad +1,022, \quad +1,058, \quad +0,98, \quad +1,064, \quad +1,02, \quad +1,023.$$

La moyenne est $+1,035$. Les résultats sont encore de même sens.

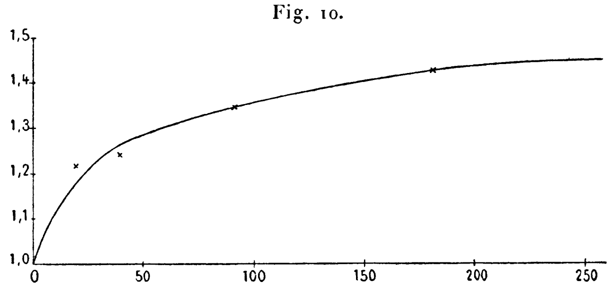
IX. *Influence de la vitesse de la roue.* — Nous avons considéré, dans ce qui précède, ce qui se passe pour des vitesses très grandes; nous allons exposer les résultats pour des vitesses variables depuis o jusqu'à la limite obtenue. Il serait d'ailleurs impossible de faire des vérifications numériques et de choisir entre les diverses hypothèses que l'on peut proposer pour expliquer les phénomènes et que nous aurons l'occasion de discuter au moyen des résultats suivants, par la raison que l'on doit obtenir les différents points de la courbe (*fig.* 10) à l'aide de clichés différents.

Le nombre des interruptions sur des poses de 5^m variait de o à 180. Voici les valeurs trouvées pour le rapport R des déviations galvanométriques pour les points où le nombre des interruptions est nul et ceux où il est 20, 40, etc. :

Nombre des interruptions...	20	40	90	180
R..........	1,224	1,238	1,35	1,44

Bien que non rigoureusement comparables, on voit combien ces déterminations sont régulières. On se servait pour ces expériences d'un tournebroche qu'on avait le soin de remonter à fond au commencement de chaque

Fig. 10.



expérience. Dans ces conditions, l'axe faisait un tour en 66^s. On adaptait dessus directement avec un écrou des roues portant 36, 24, 18, 12, 8, 4 vides. Le rapport des vides à l'espace total était 0,5.

On a fait d'autres clichés avec de longues poses et en interceptant la lumière par un écran mû à la main. Voici les résultats pour deux clichés :

Avec deux interruptions... R = 1,029 | Avec cinq interruptions... R = 1,065.

On constate qu'il y a sensiblement proportionnalité; la proportionnalité exacte donnerait 1,072 pour le deuxième cliché. Ces résultats concordent absolument avec les précédents, malgré les conditions si différentes d'obtention.

Dans ces dernières expériences, nous sommes encore loin d'une période assez petite pour que le noir en devienne indépendant.

X. *Étude comparative de l'action des diverses couleurs.* — La question qu'il s'agit de résoudre peut s'énoncer ainsi : Existe-t-il des différences spécifiques dans l'action des différentes couleurs, ou tout se borne-t-il à une question de quantité? Peut-on remplacer une certaine intensité violette par une autre rouge sans modifier les résultats?

On a choisi deux verres colorés, l'un violet foncé ne laissant pas passer de rouge, l'autre jaune clair, laissant passer le jaune et le vert, ce dernier assez lumineux. On interposait à volonté l'un ou l'autre verre devant le point lumineux, foyer conjugué de la flamme d'une lampe à pétrole par rapport à une lentille et plaçant le cliché à des distances variables, on cherchait à égaliser les effets des deux sources. La lumière violette étant plus active que la jaune, on plaçait le cliché à une distance petite et invariable pour obtenir les épreuves impaires et à une distance grande et variable pour obtenir les épreuves paires. On calculait, à l'aide des quatre premières, quels auraient dû être les noirs des secondes et une courbe d'interpolation permettait de trouver la distance pour laquelle l'égalité des effets aurait été réalisée.

Ainsi, le cliché étant placé à 220^{mm} pour le jaune, on a trouvé que, pour différents clichés, l'égalité était réalisée, le cliché étant placé pour le violet à 1413^{mm}, 1443^{mm}, 1453^{mm}, 1442^{mm}, 1413^{mm}, 1384^{mm}. Ces premières expériences montrent que, pour différentes plaques, l'égalité des effets n'est pas réalisée à la même distance; de même que, pour la même lumière, différentes plaques sont très inégalement sensibles, de même le rapport des sensibilités pour deux lumières différentes varie aussi d'une plaque à l'autre; ces dernières variations sont toutefois plus faibles que les premières.

Ceci posé, on sait que la théorie de M. Becquerel est la suivante : les rayons ont deux sortes d'actions suivant leur réfrangibilité. Les violets sont excitateurs, les rouges n'excitent pas, mais continuent l'action des rayons violets. Ces résultats pourraient s'expliquer par ce fait, qu'une lumière peu intense, venant après une forte, a plus d'action que si elle l'avait précédée. Les rayons rouges, qui seuls n'ont aucune action ou une très faible, peuvent en avoir une sur la plaque insolée déjà, tout comme le ferait une faible intensité violette. Mais voici des expériences plus directes :

Plaçant les clichés à la distance de 220^{mm} pour le jaune et 1425^{mm} pour le violet, superposons les actions en les intervertissant. Posons 15^s dans le jaune, puis 15^s dans le violet pour l'épreuve 1, 15^s dans le violet et 15^s dans le jaune pour l'épreuve 2, etc., et comparons les résultats. On a obtenu, pour trois clichés,

$$\rho = +0{,}033, \quad +0{,}000, \quad +0{,}042;$$

le signe + indiquant que l'action a été plus vive, c'est-à-dire le noir plus fort, aux points où le rouge avait posé d'abord, ce qui est en contradiction avec la théorie de M. Becquerel, mais s'expliquerait très bien de la manière suivante. On a vu que la distance où il y avait égalité entre les actions du verre jaune et du verre violet est variable et a passé, pour les clichés cités ci-dessus, de 1384^{mm} à 1453^{mm}, entre lesquelles positions l'intensité varie, d'après la loi du carré des distances, de plus de $0,1$ de sa valeur. A la distance invariable choisie, 1425^{mm}, le violet peut être plus ou moins intense que le jaune ou égal pour les clichés sur lesquels on a opéré. Il suffit que pour les clichés donnant un $\rho > 0$, on le suppose plus faible et égal pour le cliché donnant un ρ nul, pour que les observations V expliquent parfaitement les résultats obtenus.

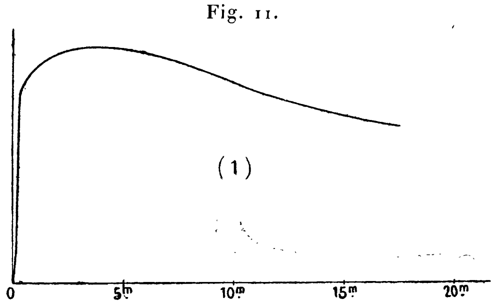
XI. *Du renversement.* — Nous avons vu que la courbe des noirs après une portion concave vers le haut monte rectilignement vers les noirs intenses : nous n'avons rien préjugé sur la forme de la courbe. L'expérience montre que, si la durée des poses devient considérable, le noir passe par un maximum, décroît pour croître de nouveau dans certains cas. Voici en quels termes le phénomène est décrit par M. Janssen (*Comptes rendus,* t. XCI). On obtient :

« 1° Une image négative ordinaire; 2° un premier état neutre : la plaque devient uniformément obscure sous l'action du révélateur; 3° une image positive qui succède au premier état neutre; 4° un second état neutre, opposé au premier et où la plaque devient uniformément claire par l'action du révélateur; 5° une deuxième image négative, semblable à l'image négative ordinaire, mais en différant par les états intermédiaires dont elle en est séparée et par l'énorme différence d'intensité lumineuse qui est nécessaire pour l'obtenir; 6° un troisième état neutre où l'image négative du second ordre a disparu et se trouve remplacée par une teinte uniforme. »

On a d'abord cherché à préciser cette description en construisant la courbe des noirs. On ne peut plus utiliser directement la pile, les noirs sont trop intenses; on a dû se servir des clichés pour en obtenir d'autres qui ont pu être directement étudiés. On a fait poser, par exemple, une bougie à 20^{cm} de la plaque. Le noir augmente d'abord avec une extrême rapidité; au bout de 2^s on est déjà tout près du maximum; la courbe reste alors longtemps presque horizontale, puis baisse lentement et presque indéfiniment. On a pu poser plusieurs heures sans trouver un minimum. Les expériences sont délicates, car, à cause des phénomènes d'irradiation, on doit se servir de plaques différentes dont les propriétés sont très variables. Pour constater sûrement la position du maximum, il est bon d'opérer comme suit : on fait poser la plaque entière, 5^m par exemple; on en recouvre une partie avec un diaphragme et l'on donne une nouvelle pose de 10^m; l'espace qui a deux fois posé se détache en foncé ou en clair sur le reste de la plaque; à la condition de regarder la plaque au jour, en la plaçant sur un grand carton dans lequel on a fait un trou, afin de se protéger contre la lumière, l'œil distingue alors les moindres différences. Ici nous n'avons trouvé qu'un maximum; en opérant avec le soleil on obtient la courbe suivante.

Les abscisses représentent des secondes; les plaques posaient au grand soleil d'un jour très pur (septembre), sans interposition d'aucune lentille; elles étaient développées au fer. La courbe des noirs à l'échelle employée monte presque verticalement, passe par un maximum où elle doit probablement présenter la forme de la *fig.* 1, puis redescend; après une seconde de pose, on a dépassé le maximum. Mais la courbe présente un minimum vers 8^s, après quoi elle remonte d'abord brusquement, ensuite très lentement; on a continué l'expérience jusqu'à 300^s. On n'a pas représenté la première

Fig. 11.



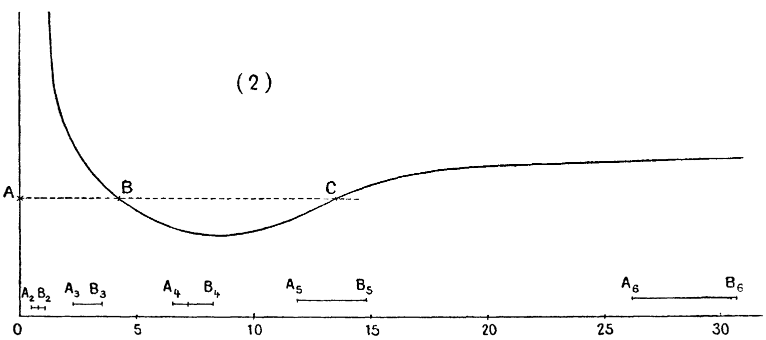
partie de la courbe. Il est facile de s'expliquer en détail les lois de M. Janssen. En effet, il faisait poser des objets très lumineux et dont le rapport des intensités ne devait pas différer beaucoup de l'unité. Les divers noirs correspondant aux divers points de l'objet auraient été à peu près les mêmes si, avec une intensité constante, les poses eussent varié dans le même rapport. Pour déterminer les effets obtenus, il suffit de faire glisser sur l'axe des temps de la courbe une petite droite dont la longueur soit proportionnelle à sa distance à l'origine et de voir le rapport des intensités pour les bouts de la droite. Les lois de M. Janssen s'ensuivent immédiatement si l'on remarque que la *fig.* 2 pour le maximum doit présenter la forme en plateau de la courbe (1).

Bien que, aux trois points A, B, C, le noir soit devenu le même, il serait faux de dire que « la lumière détruit peu à peu son travail primitif, et la surface sensible peut même, en quelque sorte, revenir à son état premier et être capable alors de recevoir une nouvelle impression. » (LONDE, *Traité pratique de développement*, p. 74). Les tangentes aux trois points sont inégales, puisque le $\frac{dN}{dt}$ positif en A et C est négatif en B. La plaque pour ces trois noirs égaux est dans un état tout à fait différent. De plus, ce minimum est très loin d'être égal à 1.

D'ailleurs ces remarques vont se préciser par la suite.

XII. *Intensité constante. Cas où $\int \mathrm{I}\,dt$ reste constant.* — Rapportons les courbes à des abscisses d'égale énergie. Nous savons, d'après les expé-

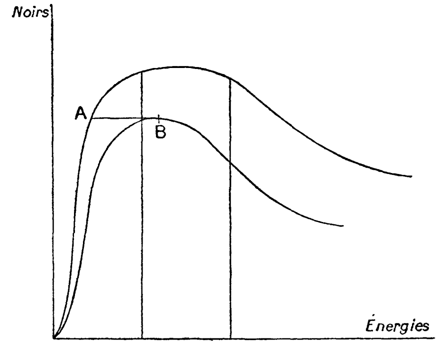
Fig. 12.



riences IV, que, pour de faibles énergies dépensées, les courbes ne coïncident pas ; celle qui correspond à la plus grande intensité est au-dessus de celle dont l'intensité est plus faible et la pose la plus longue. Les courbes continuent-elles dans cette position relative et comment les maxima respectifs sont-ils disposés ?

L'expérience apprend que les courbes ne se coupent pas et que les maxima ne correspondent pas à la même ordonnée. L'abscisse du maximum décroît avec l'intensité. Pour le montrer, on s'est servi de la lampe à pétrole et l'on disposait les clichés à des distances variables, mais assez grandes (supérieures à 50^{cm}) pour que la loi du carré soit sensiblement exacte. On fait poser les clichés dans des boîtes percées de trous. La première laissait à découvert un cercle de $3^{\mathrm{cm}},5$ de diamètre, la seconde un cercle concentrique de 2^{cm} de diamètre. On faisait successivement poser le grand cercle (pose totale PT) et le petit (pose partielle PP), et l'on constatait s'il y avait ou non renversement. Des expériences préliminaires déterminaient préalablement, d'une manière approximative, les conditions d'obtention du noir maximum. Les résultats ont toujours été les mêmes sur un grand nombre de clichés. Quand il y avait renversement pour une certaine intensité, il y avait toujours renversement pour une intensité moindre à énergie égale. Les expériences ont été poussées jusqu'à cinq heures de pose.

Fig. 13.



Exemple : à 50^{cm}, PT = PP = 8^m donne, pour les plaques Lumière bleues et la lampe à pétrole (grand modèle, niveau constant, flamme de 2^{cm} de hauteur à peu près), un renversement à peine indiqué. A 200^{cm}, PT = PP = $2^h 8^m$ donne un renversement très net.

Pour montrer que les courbes ne se coupent pas, on a fait sur les deux moitiés d'une plaque des poses d'égale énergie. Ces clichés, beaucoup trop noirs pour être étudiés directement à la pile thermoélectrique, servaient à en obtenir d'autres disposés avec leurs sept épreuves, comme il a été expliqué, et des noirs tels qu'on les pouvait étudier à la pile. On a toujours trouvé un noir d'autant plus faible que l'intensité était plus faible à énergie constante.

Les courbes sont donc bien comme l'indique la figure.

On peut corroborer ces résultats par d'autres mesures. On a étudié le rapport des noirs donnés par ces derniers clichés. Sans attribuer à ces mesures une précision qu'elles n'ont pas, car le rapport des noirs, dans ces clichés, n'est pas égal au rapport des clichés primitifs, les nombres trouvés sont instructifs. En voici quelques-uns :

Clichés à 50^{cm} et 100^{cm} :

Rapport des intensités......... 1:4;

Poses... 2^m et 8^m, $R = 1,23$; 4^m et 16^m, $R = 1,35$; 8^m et 32^m, $R = 1,46$.

Clichés à 75^{cm} et 125^{cm} :

Rapport des intensités......... 9:25;

Poses... $4^m,5$ et $12^m,5$, $R = 1,15$; 9^m et 25^m, $R = 1,29$; 18^m et 50^m, $R = 1,44$.

De plus, le noir pour les diverses poses restait sensiblement constant pour les distances 100^{cm} et 125^{cm}; pour ces intensités, on était parvenu au maximum; il augmentait donc pour les distances 50^{cm} et 75^{cm}, puisque le rapport R est croissant. Donc, pour ces distances, on n'était pas encore au maximum, et en effet, pour la distance 50^{cm}, le maximum doit être seulement réalisé pour 8^m, ainsi que d'autres expériences l'ont montré.

XIII. *Poses interverties.* — Nous avons vu (V) qu'une faible intensité, venant après une forte, a plus d'action que si elle la précède. Ce phénomène est très net pour le renversement. Voici une expérience comme exemple.

Les clichés recevaient à 50^{cm} une pose de 5^m et une pose de $31^m 15^s$ à 125^{cm}. On a fait les combinaisons et obtenu les résultats suivants :

	50^{cm}.	125^{cm}.		
I.........	PTPP	»	Pas de renversement.	Rien.
II.........	»	PTPP	»	»
III........	PT	PP	Renversement.	
IV........	PP	PT	Pas de renversement.	Rien.

Ainsi, alors qu'une pose de 5^m à 50^{cm}, venant après une pose égale, ne produisait rien, une pose de $31^m 15^s$ à 125^{cm}, qui correspond à la même énergie, produit un renversement. Il semblerait que la plaque amenée en A par la première pose passât en B au début de la seconde et que le point figuratif n'eût plus qu'à descendre ensuite le long de BC. Mais ce serait là une explication très insuffisante, car rien ne prouve que les points A et B de même noir correspondent à un même état de la plaque; le contraire est même plus probable. Ce mode d'explication ne pourrait pas servir pour les expériences V. La cause de ces phénomènes sera plus loin définie.

XIV. *Poses interrompues.* — Nous avons vu (VIII) que, si une intensité constante I traverse une roue dentée dans laquelle le rapport des vides à la surface totale μ est, par exemple, 0,2, le noir produit par une pose de durée t est loin d'être aussi fort que le noir produit sans roue par la même intensité et une pose cinq fois plus faible. L'intensité I, à travers une roue au cinquième, a même un effet moindre que l'intensité I/5 constante, au moins pour des vitesses assez grandes. Nous avons vu plus haut (XII) qu'à énergie constante, quand on diminue l'intensité, on rapproche de l'axe des noirs l'ordonnée du maximum. Le même effet se produit avec la roue.

Ainsi, à 50^{cm} :

Roue au cinquième.	Sans roue......	$PT = PP = 8^m$	Inversion très faible.
	Avec roue......	$PT = PP = 40^m$	Beaucoup plus nette.

Il y avait à la minute 4000 interruptions à peu près.

De même, à 30^{cm} :

Sans roue...........	$PT = PP = 2^m$,	Rien.
Avec roue...........	$PP = PT = 10^m$.	Renversement.

De plus, les clichés sont toujours plus clairs avec la roue que sans la roue à énergie égale, absolument comme si l'on avait diminué l'intensité en laissant l'énergie égale.

XV. *Étude comparative des différentes couleurs.* — Il s'agit de revenir sur la question posée au § X et dont la solution a été laissée pendante. Si l'on pouvait introduire séparément les radiations de diverses réfrangibilités dans les équations fondamentales qui servent à représenter les phénomènes précédents, en remplaçant I par un terme de la forme $b_1 I_1 + b_2 I_2 + \ldots$ pour deux systèmes de radiations $I_1 I_2 \ldots$ et $I'_1 I'_2 \ldots$, tels que l'on ait

$$b_1 I_1 + b_2 I_2 + \ldots = b'_1 I'_1 + b'_2 I'_2 + \ldots,$$

tous les phénomènes devraient être identiques. Et en particulier le renversement devrait se produire au bout d'un même temps de pose. Réciproquement, dans ces hypothèses, si le maximum a lieu pour le même temps de pose, tous les autres phénomènes sont identiques. Partant de là, on a cherché à produire, dans le même temps, le renversement avec de la lumière blanche (lumière ordinaire de la lampe) et la même lumière ayant traversé un verre jaune ne laissant passer que le jaune et le vert. On a trouvé que, le cliché sous le verre jaune étant placé à 15^{cm} de la lampe, le renversement se faisait certainement plus tôt que pour la lumière blanche, le cliché étant placé à 200^{cm}. Certainement, au point de vue du renversement, la lumière blanche n'était pas 180 fois plus intense que la jaune. Ceci posé, il résulte des hypothèses que la lumière blanche à 200^{cm} doit produire moins d'effet que la jaune à 15^{cm}. L'expérience dément complètement ces conclusions.

Pour le renversement de la lumière jaune, il fallait 3^h30^m. La lumière était très faible.

On a d'abord essayé si, pour des poses courtes, les noirs seraient égaux. Le cliché étant à 15^{cm} pour le jaune, à 200^{cm} pour le blanc, on a obtenu en 5^s, sur le même cliché, des épreuves dont on pouvait facilement comparer les noirs; la lumière blanche donnait des noirs beaucoup plus intenses.

On a ensuite comparé les effets de renversement sur des clichés qui avaient posé leurs poses totales (PT) à 50^{cm} pendant 6^m en lumière blanche. Les PP étaient de 30^m en lumière jaune à 15^{cm} et en lumière blanche à 200^{cm}. La dernière donnait le renversement, la première ne le faisait pas. Les expériences recommencées avec une PT de 10^m ont donné les mêmes résultats.

SECONDE PARTIE.

ÉTUDE THÉORIQUE.

Théorie de l'action lumineuse.

Bien que nos résultats expérimentaux ne nous permettent aucune vérification numérique, ce serait une erreur de croire qu'on ne puisse s'en servir pour essayer une théorie de l'action lumineuse; car la forme des équations différentielles qui représentent un phénomène peut être déterminée, sans qu'on ait besoin de préciser la valeur des coefficients numériques. Nous allons chercher quel degré de complication minimum on est forcé d'admettre dans les équations différentielles pour qu'elles ne soient pas contradictoires avec les résultats obtenus. Nous partirons donc des plus simples et nous les généraliserons jusqu'à ce qu'elles renferment tous les faits à expliquer.

Soit I l'intensité lumineuse donnée en fonction du temps $I = f(t)$ (1).

Soient $a_1, \ldots, a_n$ des quantités en nombre n suffisant pour fixer sans ambiguïté l'état d'une plaque après l'action lumineuse. Ce sont, par exemple, les poids de bromure d'argent susceptibles d'être ultérieurement transformés par un certain réactif dans les divers composés $A_1, \ldots, A_n$. Les quantités $a_1, \ldots, a_n$ sont supposées indépendantes; si l'on veut, les réactions chimiques d'où résulte la formation des composés A ne sont liées par aucune équation nécessaire.

L'hypothèse la plus simple consiste à poser que la variation des $a_1, \ldots, a_n$, pendant le temps dt et sous l'action d'une intensité I, est une fonction de cette intensité et de l'état de la plaque et qu'elle ne dépend pas de la manière suivant laquelle les $a_1, \ldots, a_n$ ont pris leurs valeurs actuelles. Nous aurons donc les deux systèmes d'équations

$$(1) \qquad I = f(t), \qquad\qquad (2) \quad \begin{cases} \dfrac{da_1}{dt} = \varphi_1(I, a_1, \ldots, a_n), \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots, \\ \dfrac{da_n}{dt} = \varphi_n(I, a_1, \ldots, a_n). \end{cases}$$

La connaissance de ces deux systèmes entraîne la solution du problème; car il suffit de transporter l'équation (1) dans (2), d'intégrer (2), de déterminer les constantes par la condition que, pour $t=0$, les $a_1, \ldots, a_n$ prennent des valeurs $a_{10}, \ldots, a_{n0}$, qui généralement ne sont pas nulles.

Définition du noir.

Les quantités $a_1, \ldots, a_n$ ne sont pas susceptibles de mesures directes; on ne les atteint qu'en agissant sur la plaque par un réactif qui la détruit; il se produit, par exemple, une couche plus ou moins opaque, dont on détermine le noir N_1. Ce noir ne dépend que de l'état de la plaque, du réactif employé et de son mode d'emploi. Pour un mode d'emploi donné, on a

$$N_1 = F(a_1, \ldots, a_n),$$

avec la condition imposée par la définition des noirs $0 = F_1(a_{10}, \ldots, a_{n0})$.

Mais la réciproque n'est pas vraie; le noir ne détermine pas complètement l'état de la plaque avant le développement. Soit arbitrairement $I = f(t)$; le système (2) donne

$$a_1 = \psi_1(t), \ldots \qquad \text{et} \qquad N_1 = F_1[\psi_1(t)\,\psi_2(t), \ldots],$$

équation complètement déterminée.

Résolvant par rapport à t, on tire plusieurs valeurs de t pour un même N_1. De même, pour toute autre fonction $I = f(t)$. Il y a donc une infinité d'états de la plaque qui correspondent au même noir.

Les développements différents sont caractérisés par des fonctions F différentes, où la durée du développement entre comme paramètre. A l'aide de deux développements différents, on peut savoir si le nombre des a est ou non supérieur à l'unité. Car F_1 et F_2 étant des fonctions distinctes, l'une peut rester constante quand l'autre varie, à moins que $n = 1$, auquel cas, F_1 restant constante, F_2 l'est aussi.

Soit $n > 1$, la variation du noir pendant le temps Δt ne dépend pas seulement du noir N_1 qu'on aurait obtenu en développant la plaque au début de l'intervalle Δt et de l'intensité I au temps t. Car on a

$$N_1 = F_1(a_1, \ldots, a_n), \qquad \frac{dN_1}{dt} = \frac{\partial F_1}{\partial a_1}\frac{da_1}{dt} + \ldots;$$