-IX-h

BULLETIN DE L'O.M.M. LA METEOROLOGIE ET L'IQSY par WARREN L.GODSON *

On a dit en plaisantant que l'IQSY était un programme international dans sa phase initiale. Dépouillée de son caractère spirituel. cette affirmation est vraie et le présent article se propose de faire en sorte que l'enthousiasme qui a donné naissance à ce programme ne soit pas enseveli dans de pieuses résolutions, mais qu'il soit entretenu et stimulé de telle manière que celui-ci non seulement tienne ses promesses, mais les dépasse. Les Années internationales du soleil calme (IQSY), prévues pour 1964-1965, constitueront une période d'observations et d'études géophysiques intensives à une époque d'activité solaire minimale; ce programme complète ainsi celui de l'AGI, que l'on avait fait corncider avec une période d'activité solaire maximale. Il est évident que l'IQSY n'aurait pas reçu l'appui général qui lui a déjà été accordé, si le monde scientifique ne s'était rendu compte de l'énorme succès de l'AGI, succès qui a même dépassé toute attente. Il vaut donc la peine de nous pencher quelques instants sur la nature et les raisons de ce succès; ce faisant, nous ne verrons que mieux comment il faut s'y prendre pour qu'un succès comparable couronne cette nouvelle entreprise.

Succès de l'AGI.

Avant tout, l'AGI a éveillé l'intérêt et frappé l'immagination du grand public, soit parce qu'il s'agissait d'un programme véritablement international auquel collaborèrent pratiquement toutes les nations, soit parce que ses aspects les plus spectaculaires représentaient des progrès notoires très importants. L'AGI fit se concentrer l'attention populaire sur les sciences atmosphériques en particulier, et le grand public s'aperçut avec joie que les gouvernements et les hommes de science jugeaient utile de consacrer des ressources considérables à des travaux non militaires dans ces domaines. Il est probablement juste d'affirmer que, grâce à l'AGI, l'exploration de l'espace extra-atmosphérique a été légitimée dans une bien plus large mesure que les expériences en matière d'énergie nucléaire, bien que l'essor initial de ces activités ait eu pour point de départ, dans les deux cas, le perfectionnement des armements.

Pour les hommes de science, l'AGI a été un succès relatif puisqu'elle fut à l'origine d'un programme quasi global et quasi

^{*} L'auteur du présent article est président du Groupe de travail du programme météorologique de l'IQSY (de la CAé); il est en outre chargé de convoquer le Comité des données météorologiques destinées à la recherche (de l'AIMPA) et assume les fonctions de rapporteur de la météorologie au sein du comité de l'IQSY (du CIG).

synoptique. Avant cette période, les observations spécialisées semblent avoir été effectuées essentiellement dans les régions des latitudes moyennes où se trouvaient les spécialistes intéressés. En d'autres termes, le savant-explorateur était devenu une rareté parce que l'exploration n'avait plus besoin de lui et que la science n'était pas encore prête à se l'attacher. L'AGI a modifié cet état de choses et les études géophysiques sont devenues l'objet. et non seulement un à-côté, des expéditions entreprises. Le sondage vertical et horizontal du continent antarctique et de son atmosphère a fourni (et fournit encore, heureusement) un excellent exemple de ce concept. Toutefois, pour une raison mystérieuse que les savants ignorent eux-mêmes, un froid intense fascine bien plus qu'une chaleur torride; aussi les régions tropicales ont-elles été en grande partie négligées au cours de 1'AGI. Le fait qu'il sera mis fin à cette tendance pendant l'IQSY est un indice de la maturité scientifique des nations (et des personnes chargées de la gestion des budgets afférents aux recherches). Par exemple, lors de sa dernière session, l'Assemblée générale des Nations Unies a, dans sa résolution 1802 (Coopération internationale touchant les utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique), fait sienne une proposition recommans dant l'installation, sous les auspices de l'ONU, d'une station de lancement de fusées-sondes à l'équateur géomagnétique. Il y a de bonnes raisons pratiques pour choisir un site dans la zone aride plutôt que dans la zone tropicale humide, mais la station sera du moins située entre les tropiques.

Les météorologistes reconnaîtront sans peine l'importance d'un programme global synoptique d'observation et d'analyse. Ce qui risque de leur échapper, c'est le fait que ce principe peut s'appliquer aussi bien aux nombreux programmes spécialisés (par exemple: ozone, rayonnement, haute atmosphère) qu'à la plupart des programmes d'observation courante. C'est dans ces nouveaux domaines qu'il faut fournir un effort particulier pour procéder à des échantillonnages dans de nombreuses zones représentatives et coordonner les programmes de sondages, de manière à pouvoir effectuer une analyse synoptique à des échelles temporelles et spatiales significatives. L'AGI aura marqué un départ dans cette direction en ce qui concerne les observations aérologiques dans la stratosphère (grâce auxquelles une analyse à l'échelle des hémisphères a été possible jusqu'au niveau de 10 mb). Toutefois, même dans ce domaine (où les progrès se sont pratiquement limités à une amélioration de la performance des ballons), les résultats ont été plus prometteurs que définitifs et ont principalement servi à appeler l'attention sur les problèmes physiques et dynamiques de la stratosphère moyenne. A son tour, l'étude de ces problèmes a soulevé autant de difficultés nouvelles qu'elle en a résolu d'anciennes, et a révélé l'importance potentielle de nouveaux types d'observations (de la distribution verticale de l'ozone, par exemple) qui ne sont pas encore disponibles à une échelle quasi globale et quasi synoptique.

Dans un des paragraphes précédents, nous avons parlé du succès relatif de l'AGI. Cette remarque a été formulée à dessein et n'implique aucune critique. Un certain nombre de programmes qui avaient été prévus pour l'AGI, n'ont pas été mis en œuvre ou, s'ils l'ent été, ils ne furent pas entièrement efficaces pendant cette période. Dans la plupart des cas, les recherches et les progrès en matière d'instruments étaient en retard sur les prévisions, ou l'étalonnage absolu et les comparaisons d'instruments n'avaient pas été réalisés à temps. Si cela ne s'était pas produit, les auteurs des divers programmes auraient pu être accusés d'avoir fait preuve d'un pessimisme exagéré ou de manque d'imagination. Les programmes météorologiques qui entrent dans cette catégorie (par exemple ceux dans lesquels intervient l'usage de sondes pour l'observation de l'ozone et du rayonnement et celui de fusées météorologiques) furent manifestement très utiles et parfaitement appropriés aux objectifs de l'AGI et à l'avancement des sciences atmosphériques en général. L'utilité de ces programmes pour le développement de la science météorologique est même encore plus évidente aujourd'hui pour étendre les études sur la stratosphère, mettre en lumière les processus stratosphériques et interpréter les données sur le rayonnement obtenues à l'aide de satellites. Il ne faut donc reculer devant aucun effort pour mettre en ceuvre ces programmes à l'échelle synoptique.

Considérations sur les programmes internationaux.

Bien que l'on puisse inscrire dans un programme international divers projets défendables et utiles (dans le cas de l'IQSY, d'après les particularités qui les rattachent à l'activité solaire, aux études de l'AGI, à la vulgarisation scientifique ou à des objectifs antérieurement fixés qui n'ont pas été atteints), il faut se rendre compte qu'il s'agit non pas de l'utilisation d'un surcroît de crédits et de ressources en personnel, mais plutôt d'une tentative délibérée d'organiser méthodiquement, à l'échelle planétaire, les progrès de la technique en matière de recherches et dans d'autres domaines connexes. Etant donné que des études synoptiques sont nécessaires, il n'est ni rationnel ni rentable d'établir de nouveaux programmes cu d'en élargir d'anciens au hasard dans le temps et dans l'espace. Cela est particulièrement vrai dans le cas de la météorologie, dont les progrès techniques peuvent être représentés scus la forme d'une progression ascendante à peu près linéaire, avec des plateaux superposés correspondant par exemple à l'AGI et à l'IQSY. L'une des pentes qui aboutit à l'un de ces plateaux est raide, mais la suivante est normalement à peine perceptible (autrement dit, il n'y a pas de vallée entre les plateaux). C'est précisément pour cette raison qu'une entreprise internationale telle que l'IQSY semble faire porter l'accent sur des types de programmes relativement nouveaux afin que ceux-ci (dont l'établissement était tôt ou tard inévitable) puissent être conçus à une échelle (globale et synoptique) permettant d'obtenir des résultats significatifs pour ainsi dire dès le départ. Parallèlement, il conviendrait d'examiner les programmes existants et de déceler leurs lacunes, particulièrement s'ils revêtent une importance capitale pour les nouvelles études, afin qu'il soit possible, en déployant des efforts concertés, de supprimer cu de réduire ces lacunes également pendant la période choisie pour les observations et les études en question.

Tous les pays peuvent ainsi participer au programme, ce qui constitue un autre avantage; les pays qui ne sont pas prêts à aborder les nouveaux domaines (généralement coûteux) découvriront presque automatiquement des domaines appropriés, plus classiques, qu'ils n'ont pas encore entièrement explorés.

Les principes énoncés dans les paragraphes qui précèdent ont joué un grand rôle dans l'élaboration du programme météorologique de base de l'IQSY qu'ent adopté l'OMM, l'Association internationale de météorologie et de physique de l'atmosphère (AIMPA) et le Comité international de géophysique (CIG). En fait, si l'on admet ces principes (ou même seulement certains d'entre eux), le programme suit pour ainsi dire automatiquement. En outre, il ne semble guère nécessaire de justifier scientifiquement certainss observations, étant donné que leur utilité pour le développement des sciences atmosphériques est notoire et qu'elle n'est pas mise en doute. Il suffira de mentionner que les champs d'ozone, de température et de vent peuvent bien dépendre de l'activité solaire dans la stratosphère supérieure (30 à 55 km) et dans la mésosphère (55 à 85 km), que des programmes d'observation de l'ozone et du rayonnement à haute altitude et des programmes de sondages par fusées avaient été prévus pour l'AGI mais que leur mise en ceuvre n'a pas été réellement efficace au cours de cette période, que des satellites météorologiques plus perfectionnés ont attiré l'attention de l'Organisation des Nations Unies et celle des citoyens de ses pays membres, qu'il semble maintenant possible d'élever encore le niveau maximal atteint par les ballons, et que des sondages indirects de la haute atmosphère à partir du sol offrent des avantages exceptionnels pour les recherches à toutes les échelles temporelles. Dans les paragraphes qui suivent, nous allons passer en revue les principaux domaines dans lesquels s'inscrivent les études météorologiques de l'IQSY et nous essayerons de montrer comment les pays pourraient choisir d'effectuer des observations qui contribueraient de façon réelle et tangible au développement progressif de la métérrologie pendant les années 1964-1965.

Ozone atmosphérique.

Un domaine capital dans lequel l'intervention de l'OMM est relativement récente est celui de l'ozone. On se rend compte maintenant que le paramètre important est la distribution verticale de l'ozone, que l'on peut mesurer par des sondes chimiques ou optiques et, à partir du sol mais avec une moins grande précision, au moyen d'un spectrophotomètre par la méthode fondée sur l'effet Götz (Umkehr). Un programme d'observation de l'ozone total peut toutefois fournir encore bien des renseignements et serait particulièrement utile vu que l'instrument le plus précis dans ce cas

(spectrophotomètre à prisme ou à réseau de diffraction) peut être employé, même lorsque le temps n'est clair que pendant une demijournée, avec la méthode fondée sur l'effet Götz pour mesurer la distribution verticale de l'ozone. Les services qui disposent pour leurs recherches d'avions pouvant atteindre la région stratosphérique désireront peut-être envisager l'installation d'un instrument à filtre (pour mesurer l'ozone total au-dessus du niveau de vol) ou d'une sonde d'ozone (désormais récupérable) pour mesurer soit l'ozone total (méthode optique), soit la concentration de l'ozone (méthode chimique). Les sondes d'ozone peuvent également être utilisées au sol pour mesurer l'ozone en surface, qu'il est intéressant de connaître pour des études sur la pollution atmosphérique.

Rayonnement atmosphérique.

Un autre domaine capital dans lequel 1'OMM, cette fois-ci, a déjà une longue et honorable tradition est celui du rayonnement atmosphérique (solaire et terrestre). On se rend compte maintenant que le paramètre important est la distribution verticale du flux radiatif net, particulièrement au sol et dans la partie supérieure de l'atmosphère. Ce sont les satellites artificiels qui constituent le moyen le plus commode de mesurer ce paramètre dans cette partie de l'atmosphère, mais les services qui auront un tel moyen à leur disposition sont évidenment peu nombreux. Le sommet de l'atmosphère n'est fort heureusement pas défini de façon rigoureuse dans ce contexte et une observation effectuée à l'aide d'une sonde de rayonnement (souvent appelée sonde radiométrique) à haute altitude fournit des renseignements pour ainsi dire équivalents avec, en plus des données sur la distribution verticale à travers toute l'atmosphère, ce qui offre un grand intérêt pour ceux qui s'occupent de couches particulières ou qui font intervenir les taux de refroidissement radiatif dans les modèles de prévision numérique. Le flux radiatif net au sol est relativement facile à mesurer, et l'on obtient un enregistrement continu d'un paramètre dont les valeurs intégrées dans le temps sont précieuses pour l'étude de la circulation générale, du bilan énergétique et du bilan hydrique au-dessus des continents et des océans. Les valeurs intégrées dans l'espace sont évidemment plus importantes que les valeurs relevées à quelques endroits seulement; l'on se rend compte généralement que la meilleure manière d'obtenir ces valeurs est de procéder à une synthèse théorique de toutes les données existantes sur la température, le raycnnement et les nuages. Pour prévoir le flux radiatif net, nous devons être à même de prévoir ses composantes (flux de rayonnement solaire et terrestre) et cela n'est possible que si elles sont toutes mesurées à certaines stations et si la plus grande composante (flux de rayonnement solaire) est mesurée dans un grand nombre de stations. C'est ainsi que, même en lançant ou en élargissant un programme d'observation du rayonnement solaire, on contribuera à l'établissement d'une climatologie du rayonnement net en surface s'étendant à de vastes zones.

Observations aérologiques.

Bien que les études de météorologie physique soient intéressantes et importantes, on ne saurait nier que les recherches vraiment fundamentales sont celles qui portent sur la météorologie dynamique, d'autant qu'il est maintenant possible de résoudre rapidement certains problèmes en utilisant des calculatrices électroniques, et de transformer ainsi un problème de météorologie synoptique en un problème significatif de dynamique de l'atmosphère. Lorsque nous abordons de tels problèmes, nous avons tôt fait de nous apercevcir qu'il n'est pas possible de tout comprendre (et, par conséquent, de tout prévoir) en raison des possibilités limitées de l'observation, tant sur le plan vertical que sur le plan horizontal. Les problèmes que pose la prévision à longue échéance nous montrent l'importance des phénomènes à grande échelle dans le temps et dans l'espace, de même que la prévision à très courte échéance exige des observations des conditions atmosphériques à moyenne échelle. Ce deuxième problème peut toutefois être résolu localement, tandis que le premier ne peut trouver sa solution qu'à l'échelle planétaire. Nous pouvons donc en conclure que la tout premier objectif à atteindre est la mise en place d'un réseau aérologique d'une densité appropriée, qui fournisse des données sur le vent et la température au moins jusque dans la stratosphère moyenne. Nous n'avons pas besoin de préciser ce qu'il faut entendre par "densité appropriée"; nous ne connaissons que trop bien les inconvénients des lacunes d'un réseau.

Cet objectif, il importe de l'atteindre peut-être encore plus pour la recherche que pour l'exploitation, si l'on désire que les études sur la circulation générale et la prévision numérique aboutissent à des résultats aussi satisfaisants que le laissent déscrmais entrevoir certaines considérations théoriques. Toutefois, à mesure que nous pénétrons dans la stratosphère moyenne et dans les couches supérieures, il devient plus évident que neus avens affaire à un domaine de recherches qui aura un jour ou l'autre des répercussions sur celui des applications pratiques, bien que pas dans un avenir immédiat. D'autre part, il s'agit d'une région de l'atmosphère où les effets solaires et terrestres peuvent être décelés directement; c'est également la zone de transition entre la météorologie classique et la physique de la haute atmosphère. L'exploration de ce secteur de l'atmosphère groupe diverses disciplines et permet d'aborder des problèmes qui, par leur nature et leur portée, entrent manifestement dans le cadre de l'IQSY. On sait maintenant que les stratosphères d'hiver de l'Arctique et de l'Antartique subissent un réchauffement rapide et définitif et qu'il existe dans la stratosphère équatoriale des changements importants de courants d'Est en courants d'Ouest et vice versa; ces découvers tes relativement récentes ne peuvent manquer de nous intéresser tous. Dans les deux zones, les phénomènes mentionnés se produisent plus tôt aux niveaux supérieurs et il se pose d'emblée deux questions que notre curiosité naturelle (et, il faut l'admettre, notre optimisme) nous obligent à examiner : quelles sont les incidences de ces phénomènes sur les niveaux inférieurs et que se passe-t-il

à des niveaux mêmes plus élevés ? Pour toutes ces raisons, le programme aérologique doit être étendu en altitude. Fabriquer de meilleurs ballons (pouvant atteindre le niveau de 30 à 40 km) est une solution, mais nous nous apercevons vite que les possibilités des capsules anéroïdes sont limitées et qu'il faut remplacer celles-ci par des éléments hypsométriques ou mesurer directement la portée oblique par radar (procédé qui garantit l'exactitude des valeurs du vent jusqu'aux altitudes maximales).

Il est fort probable que les méthodes aérologiques classiques ne nous permettront pas d'explorer la couche réellement intéressante située au niveau de la stratopause (50 à 55 km); elles ne nous permettront certainement pas d'explorer la mésosphère, où les problèmes relatifs à la lumière du ciel nocturne et à l'ionosphère appellent des études météorologiques. Il est nécessaire d'étendre les réseaux actuels de sondages par fusées; cette extension pourrait offrir de grands avantages au cours de l'IQSY, lorsque seront intensifiées les expériences concernant la lumière du ciel nocturne, l'ionosphère et les recherches effectuées à l'aide de grandes fusées. Il ne faut pas oublier non plus l'étude des trainées de météores par le système radar Doppler; il s'agit là d'une méthode d'observation au sol qui peut fournir des valeurs moyennes horaires du vent et de la densité dans une couche déterminée (85 à 105 km) d'une manière véritablement synoptique. Un bon réseau de ces stations accélérerait considérablement les études de la haute atmosphère.

Dans les limites du présent article, il n'est pas possible d'examiner comme il conviendrait les objectifs secondaires du programme météorologique de l'IQSY. Ces objectifs sont de deux sortes: ils englobent les études qui présentent une grande utilité mais sont moins importantes du point de vue synoptique, et celles qui font intervenir des méthodes ne se prêtant pas encore à un usage généralisé. Ces études intéressent surtout les spécialistes, mais elles constituent un défi pour les pays disposés à les aborder et fourniront des résultats d'un intérêt général, même si le programme d'observation est peut-être extrêmement limité. Ce programme comprend les observations de la vapeur d'eau, des nuages, des aérosols, de la radioactivité, de la conductibilité électrique et du gradient de potentiel - observationsqui sont toutes effectuées dans la stratosphère.

. Périodes spéciales.

Il y a deux autres aspects du programme de l'IQSY qu'il convient de souligner, de peur que les collaborateurs éventuels ne se laissent décourager par le coût d'un programme synoptique dans un domaine spécialisé. Premièrement, les systèmes de mouvement et de température dans la stratosphère moyenne (et probablement au-dessus) sont des systèmes à très grande échelle. En admettant une densité deux fois moindre par rapport à la troposphère, nous pouvons en déduire qu'une station aérologique sur quatre suffit pour effectuer

des sondages de l'ozone et du rayonnement (ou des observations par ballons jusqu'à 40 km). Un premier réseau s'étendant sur une vaste zone serait probablement même moins dense, particulièrement en ce qui concerne les sondages par fusées. À la question de l'échelle spatiale est associée celle de l'échelle temporelle. Les observations relevant de domaines spécialisés tels que ceux dont il a été question plus haut ne doivent pas nécessairement être effectuées deux fois par jour, et dans de nombreux cas même pas deux fois par semaine. Afin que les programmes d'observation permettent la meilleure analyse possible, il a été décidé que pendant l'IQSY chaque mercredi serait considéré comme une Journée météorologique régulière: les observations qui ne peuvent être affectuées qu'une fois par semaine devraient être prévues pour ce jour là. En outre, pour des sondages plus fréquents pendant des périodes relativement courtes. il est prévu un Intervalle géophysique spécial de deux semaines environ tous les trois mois. Ces deux types de péricdes spéciales assureront un rendement économique tout en fournissant le plus possible de renseignements les jours qui auront été sélectionnés pour l'analyse.

Enfin, je voudrais qu'on me permette d'ajouter une remarque personnelle. A l'heure actuelle, le programme de l'IQSY n'est réellement qu'un projet auquel de nombreux hommes de science ont consacré leur temps, leur énergie et leurs idées. Or, ce projet ne réussira que si les lecteurs du présent article y contribuent soit en prêtant du personnel, soit en fournissant des fonds et des instruments, et en y mettant tout leur enthousiasme. Les propositions présentées sont le résultat d'efforts conjugués fournis par des savants et des organismes gouvernementaux et non gouvernementaux. La mise en œuvre de ces propositions n'exigera pas moins une collaboration continue et la participation commune de tous ceux qui sont engagés dans l'étude des sciences atmosphèriques. Le programme de l'IQSY offre un champ d'action et constitue un défi pour chacun de nous -faisons en sorte que le programme de l'IQSY soit notre programme.