

## POROSITÉ DE LA CRYOSPHERE

Par G. A. MAXIMOVICH

(Présenté par O. J. Schmidt, de l'Académie, le 23.VIII. 1945)

La cryosphère est la géosphère de l'état solide de l'eau (<sup>8</sup>, <sup>9</sup>). La plus grande partie est limitée de bas en haut par la pédosphère et la hydrosphère, et par la troposphère. Le volume de cette géosphère à phases est soumis au cours de l'année à de variations rapides. Ses limites, de même que celles de chaque géosphère, ne sont pas arrondies. Elles ne sont pas régulières. Les contours fondamentaux de ces limites se sont formés dans les temps géologiques. Le paramètre principal, déterminant la position de la cryosphère par rapport au globe, est la température. Elle est négative. La pression est son deuxième paramètre. La cryosphère est le domaine des équilibres physico-chimiques dynamiques, qui tendent vers un état stable. Cependant ces équilibres sont constamment troublés par les manifestations des énergies étant à chaque instant donné en dehors de ces équilibres. Dans la cryosphère, en sa qualité de géosphère à phases, l'état physique de la substance présente aussi un paramètre. Ce n'est que la composition chimique qui est variable.

La cryosphère est principalement concentrée dans les régions subpolaires, où elle est présentée par la glace continentale des glaciers et par la glace de mer. Son volume est égal à  $3.5 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ . Dans les autres latitudes la glace s'étale seulement sur les sommets des montagnes. En dehors de la cryosphère constante il existe des domaines de la cryosphère saisonnière, où pendant les périodes des températures basses apparaît une couche de neige et la glace sur la surface des bassins et des eaux courantes. Il est admis que le volume total de la neige est égal à  $250 \text{ km}^3$ . Par rapport à la cryosphère l'intrusion réciproque (<sup>20</sup>) des géosphères est manifestée par la formation périodique dans la troposphère de glace, qui alimente la couverture de neige, ainsi que par la formation de glace de durée dans la croûte d'efflorescence. La congélation de longue durée envahit aussi la partie supérieure de la stratosphère et d'autres géosphères plus profondes dans les régions de leur affleurement.

La phase solide d'une géosphère quelconque étant prédominante (<sup>5</sup>, <sup>6</sup>), c'est la porosité qui détermine pour celle-ci la possibilité d'intrusion des phases liquide et gazeuse. Dans les travaux précédents (<sup>19</sup>, <sup>21</sup>) nous avons donné les résultats de l'évaluation de la porosité moyenne des géosphères superficielles, à partir de la pédosphère et de la pélosphère jusqu'à l'enveloppe fondamentale (<sup>6</sup>), au-dessous du granit. La cryosphère n'a pas été examinée.

Nous sommes bien loin d'avoir complètement étudié la porosité de toutes les variétés de la cryosphère. Cela dépend du fait que la glace présente un phénomène périodique (<sup>10</sup>), en particulier dans les régions, où habite la plupart de l'humanité. En ce qui concerne cependant les variétés principales de la cryosphère: neige, glace de névé, glace des glaciers et glace de mer, nous avons les données qui permettent d'évaluer leur porosité moyenne et les limites des variations de cette dernière. Cela nous permet aussi d'évaluer la porosité moyenne de la cryosphère.

C'est sur la neige que nous avons le plus des données, sur sa densité en particulier. Elle varie largement. La neige tombée pendant un temps doux et à basse température est la moins dense. La densité de la neige fraîchement tombée à une température voisine de  $0^\circ$  est presque trois fois plus grande. La densité de la neige est augmentée à la suite des tempêtes de neige, pendant lesquelles les masses de neige sont transportées de place en place, les plus grands flocons de neige sont brisés pendant ce transport, et la densité de la couche de neige augmente. Les dégels contribuent aussi à l'augmentation de sa densité. D'après les observations à Lesnoy, la densité moyenne de la neige faisait: en novembre 0.14, en décembre 0.18, en avril 0.32. La densité de la neige atteint 0.5 pendant les dégels. La densité de la glace pure atteint 0.9174 (<sup>12</sup>) et 0.9176 (<sup>16</sup>), ou en moyenne 0.9175. Ainsi la porosité de la neige varie de 92.5 pour cent (pour la neige fraîchement tombée à température basse) jusqu'à 45.5 (porosité de la neige qui était restée longtemps après le dégel). La porosité moyenne, qui peut être admise pour la neige, est égale à 75 pour cent.

La porosité de la glace de névé varie de 30 à 50 pour cent. La densité de la glace bulleuse est égale à 0.85, donc sa porosité est égale à 7.3 pour cent (<sup>13</sup>, <sup>14</sup>). La porosité de la glace des glaciers est de 1–4 pour cent, ou en moyenne 2.5 pour cent; celle des aïsb ergs – de 7 à 15 pour cent (<sup>3</sup>).

Il s'ensuit que les sédiments de glace ou la neige possèdent la plus grande porosité. Les processus diagénétiques transforment les sédiments de glace dans une roche – glace de névé. La porosité moyenne diminue alors de 75 à 40 pour cent. Le métamorphisme de cette roche de glace (glace de névé) produit la première roche métamorphique – la glace bulleuse, et ultérieurement la glace des glaciers. La porosité diminue conformément à 7.3 et 2.5 pour cent. L'air, qui se trouvait dans la glace de névé, est exprimé en partie par des fissures et des canaux tout petits où il est en partie comprimé et reste sous une pression qui atteint 10–12 atm.

La densité de la glace de mer a été déterminée bien des fois (<sup>2</sup>, <sup>4</sup>, <sup>11</sup>, <sup>15</sup>, <sup>22</sup>, <sup>23</sup>). Elle dépend de sa salinité et du volume des bulles gazeuses y contenues. Les variations de la porosité de la glace dans le golfe de Finlande atteignent 4 pour cent (<sup>1</sup>), la porosité dans la mer de Barents atteint 8 pour cent et même davantage (<sup>14</sup>). La porosité de la glace de mer varie en général de 0.7 à 8 pour cent, ce qui fait en moyenne 3 pour cent. Les glaces de mer anciennes sont les moins poreuses, étant devenues monolites sous une forte compression. Les pores de la glace de mer, ainsi que la glace elle-même, sont d'origine double. Dans la partie supérieure ce sont les pores de la neige métamorphosée, quant à la partie inférieure, ils sont dus à l'inclusion des bulles d'air, aux eaux-mères remplissant les alvéoles et les capillaires, et à d'autres agents de moindre importance. Les données obtenues sont présentées dans le tableau suivant, où les glaces sont classées selon leur origine (<sup>18</sup>).

### Porosité des glaces de la cryosphère

Génèse	Variété	Porosité en pourcentage			Groupe	Porosité moyenne
		maxim.	minim.	moyenne		
Atmogénèse	Neige	92.5	45.5	75.0	I	45.0
	Glace de névé	50.0	30.0	40.0		
	Glace des glaciers	4.0	1.0	2.5		
Hétérogénèse	Glace de mer	8.0	0.7	3.0	II	2.75

La porosité moyenne de la cryosphère est égale à 3.0 pour cent.

Il est indispensable d'étudier la porosité moyenne d'autres glaces de la cryosphère de moindre importance: «elles des grottes<sup>(15)</sup>, des rivières et des lacs.

En ce qui concerne la zone de la congélation perpétuelle, on y voit geler l'eau contenue dans les roches de la croûte d'efflorescence et de la partie supérieure de la stratisphère. La porosité y est de même insignifiante, puisqu'il s'agit ici seulement des vides sans eau et des vides dans la glace.

Considérons la porosité comme la relation du volume des vides au volume général d'une portion quelconque de la croûte terrestre, ou bien comme la relation du volume des phases solides et gazeuses au volume général; la porosité de la hydrosphère et de la troposphère serait alors au delà de 99.99 pour cent, le volume de la phase solide dans la partie inférieure de la troposphère étant égal en moyenne environ à  $3 \cdot 10^{-5}$  pour cent, et dans celle de l'océan, à  $1 \cdot 10^{-5}$  pour cent.

La porosité de la cryosphère est comparée dans le schème suivant à la porosité de la lithosphère, ainsi qu'à celle de troposphère et hydrosphère<sup>(19, 21)</sup>.

### Porosité des géosphères et des enveloppes

Troposphère	>0.99	Hydrosphère	>0.99	Cryosphère;	
Pédosphère	0.55	Pédosphère	0.5	Neige	0.75
Hypopédosphère	0.45				
	0.35				
Stratisphère	0.30			Glace de névé	0.40
	0.20				
Métamorphosphère	0.04			Glace des glaciers	0.04
	0.01				0.01
Granitosphère	0.01			Glace de mer	0.03

La cryosphère s'étale principalement sur la surface du géoïde; elle consiste d'une matière qui de liquide peut devenir solide et qui est sujette au métamorphisme, à températures basses et à pressions faibles. Toutes ses propriétés présentent une illustration de la loi régnant sur notre planète; la porosité diminue au fur et à mesure que la pression augmente.

Pour cette raison on ne peut se servir pour le globe que des données se rapportant à la glace non-métamorphosée de la cryosphère et à la neige. La porosité de la neige (0.75 pour cent) correspond à sa position dans l'espace entre la troposphère et la pédosphère. Tous les produits de la diagénèse et du métamorphisme de la neige devraient posséder une porosité qui serait caractéristique pour les autres conditions thermodynamiques du globe. C'est là la particularité de la géosphère à phases. Par conséquent, si nous voulons démontrer les variations de la porosité des géosphères avec profondeur, nous ne devons pas nous baser sur la porosité moyenne de la cryosphère. Elle est déduite par rapport aux glaces des glaciers et de mer qui prédominent sur le globe.

Il est cependant naturel que la porosité de la glace de mer (glace magmatique selon Dobrowolski), à titre de formation hétérogène, est quelque peu plus grande que celle de la granitosphère magmatique.

L'Université Gorky à Molotov.

Manuscrit reçu le 23. VIII. 1945.

### LITTÉRATURE CITÉE

- <sup>1</sup> В. И. Арнольд-Алябьев, Тр. IV Гидр. конф. Балт. стран (1932) <sup>2</sup> В. И. Арнольд-Алябьев, Тр. Ком. вечн. мерзл., 3, 127 (1933). <sup>3</sup> Н. Т. Barnes, Ice Engineering, 1928. <sup>4</sup> W. Brennecke, Ausdem Archivd. Deutsch. Seewarte, 29, 1, 216 (1921). <sup>5</sup> В. И. Вернадский, Очерки геохимии, 1924 <sup>6</sup> W. I. Vernadski, Bull. Acad. Sci. URSS, stric géogr. et geophys., 6, 251 (1942). <sup>7</sup> А. А. Григорьев, Опыт аналитической характеристики состава и строения физико-географии. оболочки земного шара, 1937. <sup>8</sup> А. В. Dobrowolski, Historia Naturalna Loda, W., 1923. <sup>9</sup> А. В. Dobrowolski, Bull. Soc. Fra deMinéral, 64, 5 (1931). <sup>10</sup> А. В. Dobrowolski, Biuletyn Tow. Geof., Warszawa 9-10, 11, 54 (1934). <sup>11</sup> E. Dryelski, Deutsche Südpolare Expedition, 1901-19 1, Géographie, 4 (1923). <sup>12</sup> H. J. Emeleus, J. W. Jances, A. Kin F. G. Pearson, R. H. Pyrcel and H. V. A. Priscoe, J. Chem. Soc., 1207 (1934) <sup>13</sup> Н. Н. Зубов, Некоторые свойства морского льда, 1932. <sup>14</sup> Н. Н. Зубов, Морские воды и льды, 276, 1941. <sup>15</sup> А. Ф. Лактионов, Тр. Ин-та изуч. Севера, 71(1931). <sup>16</sup> F. Leduc, C. R., 142, 149 (1906). <sup>17</sup> С. О. Макаров, Ермак льдах, 1901. <sup>18</sup> G. A. Maximovich, C. R. Acad. Sci. URSS, XXXI, No. (1941). <sup>19</sup> G. A. Maximovich, ibid., XXXVII, No. 7-8(1942). <sup>20</sup> Г. А. Максимович, Природа, 6, 15 (1943). <sup>21</sup> G. A. Maximovich, Bull. Acad.S URSS, série géogr. et géophys., VIII, 5, 2 98 (194 4). <sup>22</sup> F. Malmgren, T Norwegian North Polar Expedition 1918-1925 Scientific Resulte, 1, 5, 67 (192: <sup>23</sup> М. Ф. Розен, Изв. ЦГМБ ЦУМОП, 8, 221 (1929).

PHYSIQUE DU GLOBE

**POROSITÉ DE LA CRYOSPHERE**

Par G. A. MAXIMOVICH

(Présenté par O. J. Schmidt, de l'Académie, le 23. VIII. 1945)

La cryosphère est la géosphère de l'état solide de l'eau (<sup>8,9</sup>). La plus grande partie est limitée de bas en haut par la pédosphère et la hydrosphère, et par la troposphère. Le volume de cette géosphère à phases est soumis au cours de l'année à de variations rapides. Ses limites, de même que celles de chaque géosphère, ne sont pas arrondies. Elles ne sont pas régulières. Les contours fondamentaux de ces limites se sont formés dans les temps géologiques. Le paramètre principal, déterminant la position de la cryosphère par rapport au globe, est la température. Elle est négative. La pression est son deuxième paramètre. La cryosphère est le domaine des équilibres physico-chimiques dynamiques, qui tendent vers un état stable. Cependant ces équilibres sont constamment troublés par les manifestations des énergies étant à chaque moment donné en dehors de ces équilibres. Dans la cryosphère, en sa qualité de géosphère à phases, l'état physique de la substance présente aussi un paramètre. Ce n'est que la composition chimique qui est variable.

La cryosphère est principalement concentrée dans les régions subpolaires, où elle est présentée par la glace continentale des glaciers et par la glace de mer. Son volume est égal à  $3.5 \cdot 10^6$  km<sup>3</sup>. Dans les autres latitudes la glace s'étale seulement sur les sommets des montagnes. En dehors de la cryosphère constante il existe des domaines de la cryosphère saisonnière, où pendant les périodes des températures basses apparaît une couche de neige et la glace sur la surface des bassins et des eaux courantes. Il est admis que le volume total de la neige est égal à 250 km<sup>3</sup>. Par rapport à la cryosphère l'intrusion réciproque (<sup>20</sup>) des géosphères est manifestée par la formation périodique dans la troposphère de glace, qui alimente la couverture de neige, ainsi que par la formation de glace de durée dans la croûte d'efflorescence. La congélation de longue durée envahit aussi la partie supérieure de la stratisphère et d'autres géosphères plus profondes dans les régions de leur affleurement.

La phase solide d'une géosphère quelconque étant prédominante (<sup>5,6</sup>), c'est la porosité qui détermine pour celle-ci la possibilité d'intrusion des phases liquide et gazeuse. Dans les travaux précédents (<sup>19, 21</sup>) nous avons donné les résultats de l'évaluation de la porosité moyenne des géosphères superficielles, à partir de la pédosphère et de la pélosphère jusqu'à l'enveloppe fondamentale (<sup>6</sup>), au-dessous du granit. La cryosphère n'a pas été examinée.

Nous sommes bien loin d'avoir complètement étudié la porosité de toutes les variétés de la cryosphère. Cela dépend du fait que la glace présente un phénomène périodique (<sup>10</sup>), en particulier dans les régions, où habite la plupart de l'humanité. En ce qui concerne cependant les variétés principales de la cryosphère: neige, glace de névé, glace des glaciers et glace de mer, nous avons les données qui permettent d'évaluer leur porosité moyenne et les

limites des variations de cette dernière. Cela nous permet aussi d'évaluer la porosité moyenne de la cryosphère.

C'est sur la neige que nous avons le plus des données, sur sa densité en particulier. Elle varie largement. La neige tombée pendant un temps doux et à basse température est la moins dense. La densité de la neige fraîchement tombée à une température voisine de 0° est presque trois fois plus grande. La densité de la neige est augmentée à la suite des tempêtes de neige, pendant lesquelles les masses de neige sont transportées de place en place, les plus grands flocons de neige sont brisés pendant ce transport, et la densité de la couche de neige augmente. Les dégels contribuent aussi à l'augmentation de sa densité. D'après les observations à Lesnoy, la densité moyenne de la neige faisait: en novembre 0.14, en décembre 0.18, en avril 0.32. La densité de la neige atteint 0.5 pendant les dégels. La densité de la glace pure atteint 0.9174<sup>(12)</sup> et 0.9176<sup>(16)</sup>, ou en moyenne 0.9175. Ainsi la porosité de la neige varie de 92.5 pour cent (pour la neige fraîchement tombée à température basse) jusqu'à 45.5 (porosité de la neige qui était restée longtemps après le dégel). La porosité moyenne, qui peut être admise pour la neige, est égale à 75 pour cent.

La porosité de la glace de névé varie de 30 à 50 pour cent. La densité de la glace bulleuse est égale à 0.85, donc sa porosité est égale à 7.3 pour cent<sup>(13, 14)</sup>. La porosité de la glace des glaciers est de 1—4 pour cent, ou en moyenne 2.5 pour cent; celle des aîsbergs—de 7 à 15 pour cent<sup>(3)</sup>.

Il s'ensuit que les sédiments de glace ou la neige possèdent la plus grande porosité. Les processus diagénétiques transforment les sédiments de glace dans une roche—glace de névé. La porosité moyenne diminue alors de 75 à 40 pour cent. Le métamorphisme de cette roche de glace (glace de névé) produit la première roche métamorphique—la glace bulleuse, et ultérieurement la glace des glaciers. La porosité diminue conformément à 7.3 et 2.5 pour cent. L'air, qui se trouvait dans la glace de névé, est exprimé en partie par des fissures et des canaux tout petits où il est en partie comprimé et reste sous une pression qui atteint 10—12 atm.

La densité de la glace de mer a été déterminée bien des fois<sup>(2, 4, 11, 15, 22, 23)</sup>. Elle dépend de sa salinité et du volume des bulles gazeuses y contenues. Les variations de la porosité de la glace dans le golfe de Finlande atteignent 4 pour cent<sup>(1)</sup>, la porosité dans la mer de Barents atteint 8 pour cent et même davantage<sup>(14)</sup>. La porosité de la glace de mer varie en général de 0.7 à 8 pour cent, ce qui fait en moyenne 3 pour cent. Les glaces de mer anciennes sont les moins poreuses, étant devenues monolites sous une forte compression. Les pores de la glace de mer, ainsi que la glace elle-même, sont d'origine double. Dans la partie supérieure ce sont les pores de la neige métamorphosée, quant à la partie inférieure, ils sont dus à l'inclusion des bulles d'air, aux eaux-mères remplissant les alvéoles et les capillaires, et à d'autres agents de moindre importance. Les données obtenues sont présentées dans le tableau suivant, où les glaces sont classées selon leur origine<sup>(18)</sup>.

Porosité des glaces de la cryosphère

Génèse	Variété	Porosité en pourcentage			Groupe	Porosité moyenne
		maxim.	minim.	moyenne		
Atmogénèse	Neige . . . . .	92.5	45.5	75.0	I	45.0
	Glace de névé . . . . .	50.0	30.0	40.0		
	Glace des glaciers . . . . .	4.0	1.0	2.5		
Hétérogénèse	Glace de mer . . . . .	8.0	0.7	3.0	II	2.75

La porosité moyenne de la cryosphère est égale à 3.0 pour cent.

Il est indispensable d'étudier la porosité moyenne d'autres glaces de la cryosphère de moindre importance: celles des grottes (18), des rivières et des lacs.

En ce qui concerne la zone de la congélation perpétuelle, on y voit geler l'eau contenue dans les roches de la croûte d'efflorescence et de la partie supérieure de la stratisphère. La porosité y est de même insignifiante, puisqu'il s'agit ici seulement des vides sans eau et des vides dans la glace.

Considérons la porosité comme la relation du volume des vides au volume général d'une portion quelconque de la croûte terrestre, ou bien comme la relation du volume des phases solides et gazeuses au volume général; la porosité de la hydrosphère et de la troposphère serait alors au delà de 99.99 pour cent, le volume de la phase solide dans la partie inférieure de la troposphère étant égal en moyenne environ à  $3 \cdot 10^{-5}$  pour cent, et dans celle de l'océan, à  $1 \cdot 10^{-5}$  pour cent.

La porosité de la cryosphère est comparée dans le schème suivant à la porosité de la lithosphère, ainsi qu'à celle de troposphère et hydrosphère (19, 21).

#### Porosité des géosphères et des enveloppes

Troposphère	>0.99	Hydrosphère	>0.99	Cryosphère:	
Pédosphère	0.55	Pélosphère	0.5	Neige	0.75
Hypopédosphère	0.45				
	0.35				
Stratisphère	0.30			Glace de névé	0.40
	0.20				
Métamorphosphère	0.04			Glace des glaciers	0.04
	0.01				0.01
Granitosphère	0.01			Glace de mer	0.03

La cryosphère s'étale principalement sur la surface du géoïde; elle consiste d'une matière qui de liquide peut devenir solide et qui est sujette au métamorphisme à températures basses et à pressions faibles. Toutes ses propriétés présentent une illustration de la loi régnant sur notre planète; la porosité diminue au fur et à mesure que la pression augmente.

Pour cette raison on ne peut se servir pour le globe que des données se rapportant à la glace non-métamorphosée de la cryosphère et à la neige. La porosité de la neige (0.75 pour cent) correspond à sa position dans l'espace entre la troposphère et la pédosphère. Tous les produits de la diagenèse et du métamorphisme de la neige devraient posséder une porosité qui serait caractéristique pour les autres conditions thermodynamiques du globe. C'est là la particularité de la géosphère à phases. Par conséquent, si nous voulons démontrer les variations de la porosité des géosphères avec profondeur, nous ne devons pas nous baser sur la porosité moyenne de la cryosphère. Elle est déduite par rapport aux glaces des glaciers et de mer qui prédominent sur le globe.

Il est cependant naturel que la porosité de la glace de mer (glace magmatique selon Dobrowolski), à titre de formation hétérogène, est quelque peu plus grande que celle de la granitosphère magmatique.

L'Université Gorky  
à Molotov.

Manuscrit reçu  
le 23. VIII. 1945.

#### LITTÉRATURE CITÉE

- <sup>1</sup> В. И. Арнольд-Алябьев, Тр. IV Гидр. конф. Балт. стран (1932)  
<sup>2</sup> В. И. Арнольд-Алябьев, Тр. Ком. вечн. мерзл., 3, 127 (1933). <sup>3</sup> Н. Т. Вагнес, Ice Engineering, 1928. <sup>4</sup> W. Вреннеске, Aus dem Archiv d. Deutsch. Seewarte, 29, 1, 216 (1921). <sup>5</sup> В. И. Вернадский, Очерки геохимии, 1924.  
<sup>6</sup> W. I. Verнадский, Bull. Acad. Sci. URSS, série géogr. et géophys., 6, 251 (1942).  
<sup>7</sup> А. А. Григорьев, Опыт аналитической характеристики состава и строения физико-географич. оболочки земного шара, 1937. <sup>8</sup> А. В. Добrowolski,

Historia Naturalna Loda, W., 1923. <sup>9</sup> A. B. Dobrowolski, Bull. Soc. Fra de Mineral, 54, 5 (1931). <sup>10</sup> A. B. Dobrowolski, Biuletyn Tow. Geof., Warsaw 9—10, 11, 54 (1934). <sup>11</sup> E. Dryrelski, Deutsche Südpolare Expedition, 1901—19 1, Geographie, 4 (1923). <sup>12</sup> H. J. Emeleus, J. W. Jances, A. Kin F. G. Pearson, R. H. Pyrcel and H. V. A. Priscoe, J. Chem. Soc., 1207 (193 13 Н. Н. Зубов, Некоторые свойства морского льда, 1932. <sup>14</sup> Н. Н. Зубов, Мо ские воды и льды, 276, 1941. <sup>15</sup> А. Ф. Лактионов, Тр. Ин-та изуч. Севера, 4 71 (1931). <sup>16</sup> F. Leduc, C. R., 142, 149 (1906). <sup>17</sup> С. О. Макаров, Ермак льдах, 1901. <sup>18</sup> G. A. Maximovich, C. R. Acad. Sci. URSS, XXXI, No. (1941). <sup>19</sup> G. A. Maximovich, ibid., XXXVII, No. 7—8 (1942). <sup>20</sup> Г. А. Ма симович, Природа, 5, 15 (1943). <sup>21</sup> G. A. Maximovich, Bull. Acad. S URSS, série géogr. et géophys., VIII, 5, 298 (1944). <sup>22</sup> F. Malmgren, T Norwegian North Polar Expedition 1918—1925 Scientific Results, 1, 5, 67 (192 23 М. Ф. Розен, Изв. ЦГМБ ЦУМОР, 8, 221 (1929).