

IV. Les roches magmatiques : Composition chimique

IV.1. Composition chimique des roches magmatiques

La composition chimique des roches magmatiques est très importante car :

- elle renseigne sur la nature des magmas qui leur donne naissance ;
- elle permet de classer les roches qui n'ont pas ou qui ont très peu de minéraux (roches vitreuses) et donc ne peuvent pas être étudiées au microscope polarisant.

La composition chimique d'une roche magmatique dépend de :

- la composition du magma qui lui a donné naissance ;
- la profondeur de fusion du magma ;
- l'environnement tectonique où la cristallisation du magma s'est produite (dorsales océaniques, zone de subduction...).
- l'altération secondaire de la roche.

La composition chimique des roches magmatiques varie dans des limites assez étroites. L'oxygène est l'élément le plus abondant en poids et en volume, suivi par le silicium (Si). Viennent ensuite l'aluminium (Al), le fer (Fe), le magnésium (Mg), le calcium (Ca), le sodium (Na), le potassium (K), etc. Le tableau 1 donne les pourcentages en poids des éléments chimiques les plus importants de la croûte terrestre.

Oxydes	Pourcentages pondéraux (%)
1. Oxygène (O)	45,2 %
2. Silicium (Si)	27,2 %
3. Aluminium (Al)	8 %
4. Fer (Fe)	5,8 %
5. Calcium (Ca)	5,1 %
6. Magnésium (Mg)	2,8 %
7. Sodium (Na)	2,3 %
8. Potassium (K)	1,7 %
9. Titane (Ti)	0,9 %
10. Hydrogène (H)	0,14 %
11. Manganèse (Mn)	0,1 %
12. Phosphore (P)	0,1 %

Tableau 1 : Compositions moyennes en éléments chimiques (estimée en % pondéraux) de la croûte terrestre.

A cause de la prépondérance de l'oxygène, les résultats des analyses chimiques d'une roche sont ordinairement exprimés sous forme de pourcentages pondéraux d'oxydes.

Le tableau 2 donne l'intervalle des compositions chimiques en pourcentages d'oxydes des roches magmatiques.

Oxydes	Pourcentages pondéraux (%)
SiO ₂	35-78
TiO ₂	0.05-4.0
Al ₂ O ₃	5-22
MgO	0.01-30
CaO	0.5-17
FeO-Fe ₂ O ₃	0.5-15
Na ₂ O	0.3-9
K ₂ O	0.05-10
P ₂ O ₅	< 0.15

Tableau 2 : Intervalle des compositions chimiques des roches magmatiques.

On divise habituellement les éléments entre les catégories suivantes :

- Les *éléments majeurs* qui représentent plus de 99 % de la composition chimique de la roche et ont des concentrations supérieures à 1 % en poids dans les matériaux géologiques. Ce sont : SiO₂, Al₂O₃, FeO et Fe₂O₃, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, TiO₂.
 - Les *éléments mineurs* pour des teneurs comprises entre 0,1 et 1 % en masses d'oxydes. Pour les roches magmatiques les éléments mineurs typiques sont : MnO et P₂O₅.
 - Les *éléments en traces*, pour des teneurs inférieures à 0,1 %. Les teneurs en éléments-traces sont exprimées en ppm (partie par millions) en masse d'éléments. Pour les roches magmatiques typiques, les éléments en traces les plus importants sont :
 - Certains éléments alcalins et alcalino-terreux : Ce, Sr, Rb, Ba.
 - Les Terres Rares (Lanthanides) : La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Yb, Lu...
 - Les éléments de transition : Y, Zr, Nb, Ta, Ni, Cu.
 - D'autres éléments de numéros atomiques élevés (Pb, U, Th).
- Les éléments majeurs sont utilisés dans la classification des roches magmatiques. C'est aussi le seul moyen dont on dispose pour connaître la nature des roches vitreuses (roche constituée de verre).
- Les éléments en traces sont utilisés pour rechercher l'origine des magmas et donc remonter à la source des roches magmatiques.

La présentation des résultats suit en général l'ordre décroissant des valences des cations : SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, FeO, MnO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, P₂O₅, et se termine par les éléments volatils H₂O⁺ (vapeur d'eau obtenue à 100° Celsius), H₂O⁻ (vapeur d'eau obtenue à plus de 100° Celsius), CO₂, S, F, Cl, etc. (Tableau 3).

Tableau 1. Analyses chimiques en éléments majeurs et traces des roches volcaniques et subvolcaniques du bassin d'Argana

N°éch.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2
SiO ₂	46,9	48,5	47,35	49,7	45,3	50,66	43,15	47,77	47,25	52,5	52	51,8	51,2
TiO ₂	1,96	1,9	1,83	2,13	1,74	1,87	2,01	1,93	1,9	1,27	1,36	1,28	1,4
Al ₂ O ₃	16,2	17,42	17,5	15,75	13,25	18,16	17,14	17,6	17,7	13,25	13,35	13,45	13,65
FeO		4,4	4,45			6,51	6,94	7,82	6,34				
Fe ₂ O ₃		5,02	5,11			1,97	2,25	1,81	2,11				
Fe ₂ O ₃ t	9,19			10,4	10,6					10,52	10,25	9,95	10,55
MnO	0,15	0,13	0,14	0,19	0,15	0,14	0,16	0,15	0,13	0,15	0,12	0,14	0,16
MgO	5,92	4,54	5,03	5,65	9,65	5,24	4,16	4,18	4,54	8	7,5	7,2	7,15
CaO	8,05	8,31	8,47	5,92	8,05	5,66	8,24	4,59	5,41	9,15	6,62	7,3	7
Na ₂ O	4,55	4,42	4,43	5,3	2,63	5,23	4,23	5,73	5,61	1,95	3,8	3,68	3,65
K ₂ O	0,6	0,58	0,71	0,75	0,33	0,45	1,02	0,54	0,39	1,15	2,06	2,08	1,98
P ₂ O ₅	0,7	0,01	1,16	0,42	0,32	1,03	0,87	0,87	1,13	0,17	0,17	0,16	0,17
LOI	5,6	4,58	3,69	3,66	7,69	2,93	9,74	6,83	7,27	1,71	2,79	2,62	2,95
Total	99,82	99,81	99,87	99,87	99,71	99,85	99,91	99,82	99,78	99,82	100,02	99,66	99,86
Rb	7	10	12	16	9	14	36	22	14	28	37	37,5	22,5
Ba	625	717	721	253	233	1551	1306	220	1522	220	276	300	800
Sr	1040	1087	1224	308	445	1120	663	109	736	225	222	260	354
U	1,69	1,23		1,16	1,14	4,69				2,36	1,51	1,11	2,85
Th	2,11	3,73	7	6,05	0,95	5,36	5	6	5	3,52	4,72	2,16	0,42
Zr	195	229	250	87	101	301	231	308	316	118	110	110	121
Nb	30	33	33	20	24	42	36	44	42	11,5	11,5	10,4	12,4
La	38	32	32	17,8	15	38	30	26	41	16,3	14,5	15,4	17
Ce	75	72	85	34,5	29,5	118	87	72	113	33,5	32	31,5	37,5
Nd	37			21	17,5					19	19	18,5	21,5
Eu	2,1			1,79	1,49					1,35	1,33	1,33	1,42
Dy	5			4,3	3,55					4,35	4,35	4,2	4,65
Er	2,8			1,9	1,7					2,3	2,4	2,4	2,6
Yb	2,32			1,4	1,33					2,1	2,08	2,06	2,25
Y	27	25	26	20,5	17,8	27	29	29	27	23,5	23,5	22,5	24,5
Cr	152	116	116	115	290	34	84	100	45	420	300	282	250
Co	33	43	38	34	47	24	27	35	42	47	41	41	39
Ni	105	107	104	53	260	36	60	51	60	110	85	82	72
Sc	18			20	20					32	32	33,5	32,5
V	154	196	194	190	180	200	238	221	194	270	285	277	288

1: necks et dykes du Permien supérieur (ce travail); 2: coulées triasico-liasiques (ce travail); 3: coulées du Jurassique moyen (d'après les données d'Amrhar, 1995).

Tableau 3 : Exemple de présentation, dans une revue scientifique, des résultats d'analyses chimiques de roches magmatiques.

Remarques

- Dans le tableau des résultats des analyses chimiques, H_2O^+ est la vapeur d'eau obtenue à 100° , et provient de l'eau libre qui se trouve entre les grains des minéraux ou à l'intérieur des fissures de la roche. H_2O^- est la vapeur d'eau obtenue à plus 100° , et provient de l'eau liée aux minéraux, par exemple le radical OH⁻ dans la biotite ou la hornblende.
- Souvent, les pourcentages des gaz et de l'eau ne sont pas donnés dans l'analyse chimique. Dans ce cas, la quantité de tous les éléments volatils de la roche est indiqué par **la perte au feu (PAF)** ou **LOI** (*loss on ignition* en anglais) : c'est la perte de masse qui résulte de l'échauffement d'un matériau du fait du départ des espèces volatiles ; elle est mesurée lors du chauffage de l'échantillon à haute température.

$$\text{Perte au feu (\%)} = 100 \times [(\text{masse avant chauffage}) - (\text{masse après chauffage})] / (\text{masse avant chauffage}).$$

Les compositions chimiques moyennes en oxydes des principaux types de roches sont portées dans le tableau 4.

- *La composition chimique est déterminée en analysant la poudre des roches. Les principales techniques utilisées pour déterminer le pourcentage des éléments majeurs et en traces sont : la spectroscopie de fluorescence X (XRF) et l'absorption atomique (AAS).*

Oxydes	Acide (Granite)	Intermédiaire (Andésite)	Basique (Basalte)	Ultrabasique (Péridotite)
SiO ₂	71.3	57.94	49.2	42.26
TiO ₂	0.31	0.87	1.84	0.63
Al ₂ O ₃	14.32	17.02	15.74	4.23
Fe ₂ O ₃	1.21	3.27	3.79	3.61
FeO	1.64	4.04	7.13	6.58
MnO	0.05	0.14	0.2	0.41
MgO	0.71	3.33	6.73	31.24
CaO	1.84	6.79	9.47	5.05
Na ₂ O	3.68	3.48	2.91	0.49
K ₂ O	4.07	1.62	1.1	0.34
H ₂ O	0.77	1.17	0.95	3.91
CO ₂	0.05	0.05	0.11	0.30
P ₂ O ₅	0.12	0.21	0.35	0.10

Tableau 4 : Composition chimique moyenne des principales classes de roches magmatiques.

IV.2. Fréquences des roches magmatiques en relation avec leur composition chimique

La courbe de fréquence mondiale des roches, calculées sur des milliers d'analyses de roches plutoniques et volcaniques, indique deux maximums, l'un correspondant à des roches qui renferment 73 % de silice (granites et rhyolites), l'autre à des roches qui renferment 52 % de silice (basaltes et gabbros) (figure 1).

Les principales caractéristiques chimiques de ces deux grands types de roches sont les suivantes :

- la teneur en Al_2O_3 est sensiblement la même quelle que soit la teneur en silice ;
- les roches granitiques ont une forte teneur en SiO_2 et alcalins mais une faible teneur en fer total, CaO , MgO et TiO_2 ;
- les roches basaltiques ont une faible teneur en SiO_2 et alcalins mais une forte teneur en fer total, CaO , MgO et TiO_2 .

Ainsi, la teneur en Al_2O_3 ne varie pratiquement pas des roches basiques aux roches acides ; Fe total, CaO et MgO varient dans le même sens en diminuant des basaltes aux granites alors que Na_2O et K_2O varient en sens inverse.

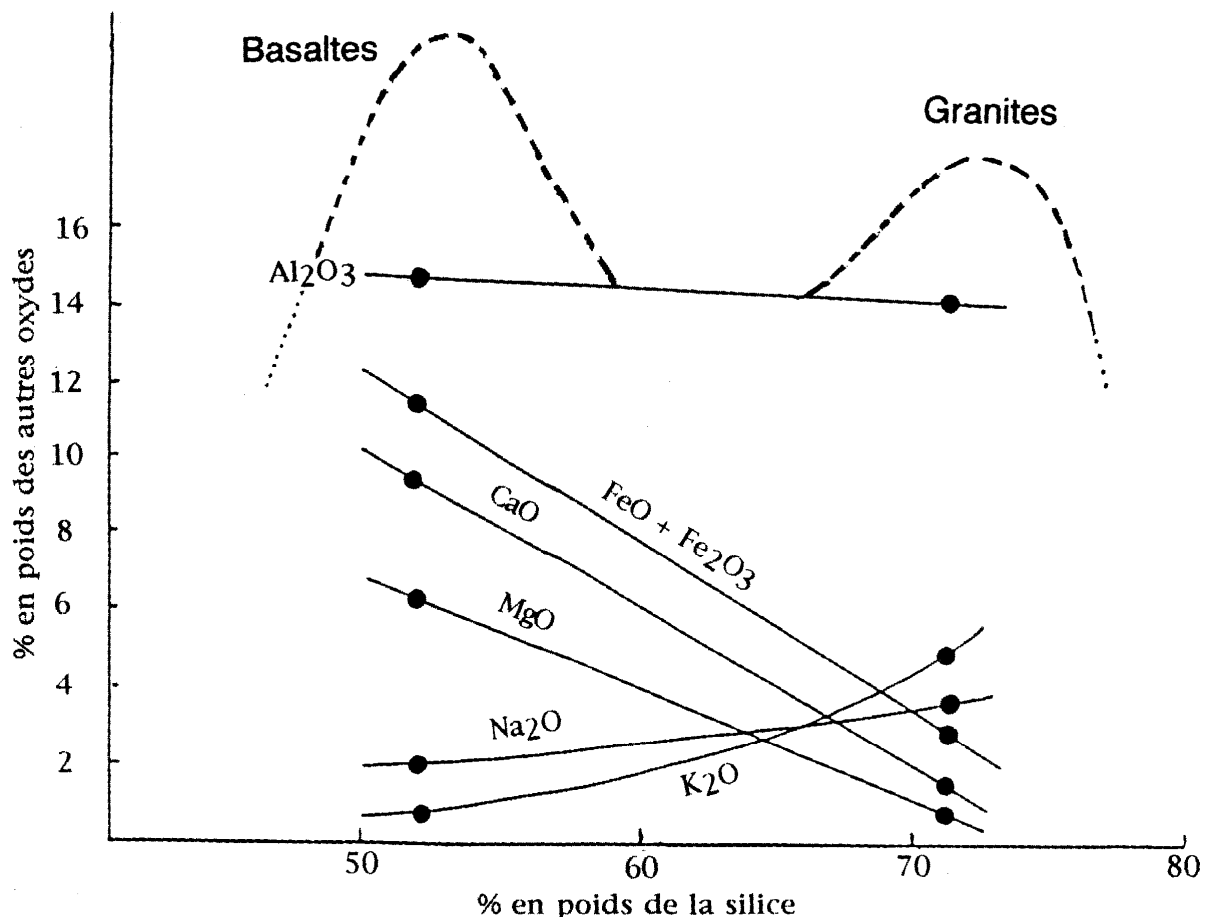


Figure 1 : Variation de teneur des principaux oxydes par rapport à la teneur en silice des roches magmatiques.

(d'après J.C. Pons, La pétro sans peine 1, minéraux et roches magmatiques)

IV.3. La norme (composition normative)

En regroupant les éléments majeurs pour construire des minéraux théoriques, de formule fixée, on calcule une composition normative, ou *norme*, qui permet des comparaisons. La norme exprime donc la composition minéralogique théorique (virtuelle) d'une roche magmatique.

Pour établir la norme d'une roche, on doit d'abord déterminer sa composition chimique, laquelle est donnée en pourcentage du poids en oxyde. Le principe de base est de distribuer les éléments chimiques : Si, Al, Mg, Fe²⁺, Fe³⁺, Ca, Na, K, Ti, P entre molécules minérales standards (quartz, orthose, albite, anorthite, néphéline, leucite, orthopyroxène, clinopyroxène, olivine, apatite, ilménite, magnétite), suivant une procédure de calcul selon des règles strictes : soit celles de Cross, Iddings, Pirsson et Washington (appelée norme CIPW), soit celles de Niggli (norme moléculaire de Niggli). Ce calcul est une opération complexe qui comporte au moins 25 étapes afin d'exprimer au mieux la composition minéralogique de la roche. La norme est donc une composition minéralogique calculée qui aide à comparer les roches volcaniques non cristallisées avec des roches plutoniques cristallisées et d'établir si il existe ou non des liens pétrogénétiques entre les deux. Le tableau 5 est un exemple des résultats de l'analyse chimique et de la norme correspondante d'une rhyolite. Les minéraux dont la présence théoriquement n'est mise en évidence que dans le calcul de norme, s'appellent **minéraux normatifs**.

- *La plus connue et la plus utilisée des normes en pétrologie moderne est la norme CIPW qui donne les minéraux normatifs en pourcentages pondéraux. Établie par W. Cross, J.P. Iddings, L.V. Pirsson et H.S. Washington (d'où son nom) en 1903, modifiée en 1912, cette norme anhydre ne tient pas compte de H₂O présent dans la roche. Le mode de calcul définit plus de 16 minéraux normatifs différents, aucun minéral ne pouvant avoir des teneurs négatives (voir TP).*

Oxydes	Pourcentages pondéraux (%)	Calcul Normatif	
		Minéraux	Pourcentages pondéraux
SiO ₂	73,3	Quartz (Qz)	33,2
TiO ₂	0,2	Orthose (Or)	31,7
Al ₂ O ₃	13,4	Albite (Ab)	25,1
Fe ₂ O ₃	1,2	Anorthite (An)	5,0
FeO	0,7	Néphéline (Ne)	-
MnO	0,1	Diopside (Di)	0,8
MgO	0,3	Hypersthène (Hy)	
CaO	1,1	Olivine (Ol)	-
Na ₂ O	3,0	Magnétite (Mt)	1,9
K ₂ O	5,3	Ilménite (Il)	0,5
H ₂ O ⁺	0,8	Apatite (Ap)	0,2
CO ₂	-		
P ₂ O ₅	0,1		

Tableau 5 : Composition chimique et normative moyenne d'une rhyolite.