

L'instrument MOMA (Mars Organic Molecule Analyser) : La recherche de la matière organique via le rover de la mission Exomars



Société Française d'Exobiologie

Société Française d'Exobiologie

Fabien Stalport, LISA, JSFE 2018



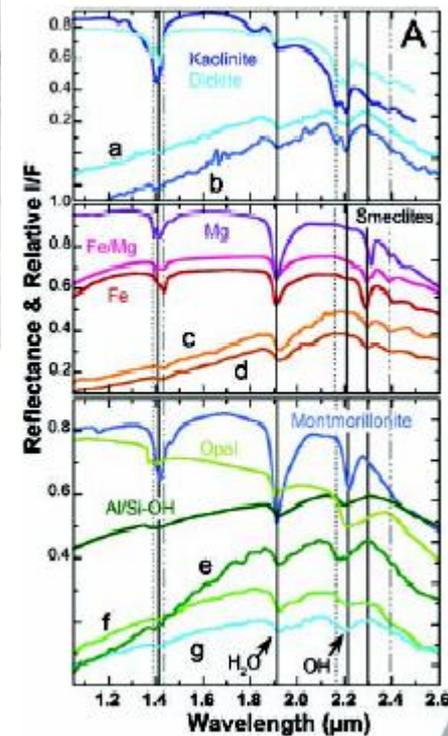
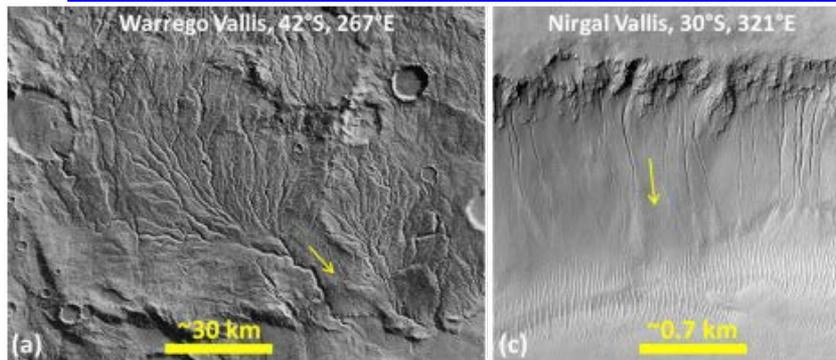


La question de l'eau liquide sur Mars



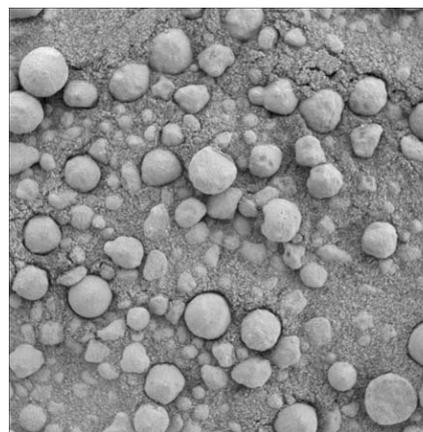
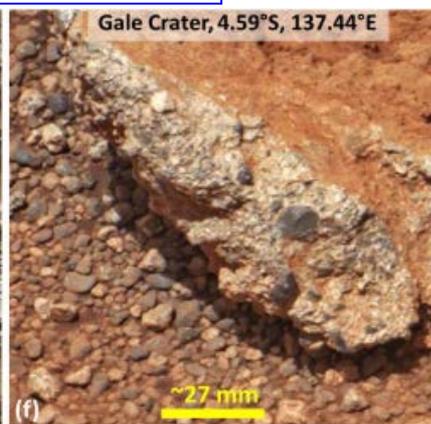
Phoenix (2007)
Glace d'eau

Observations en orbite
Traces géomorphologiques, Minéraux altérés par l'eau



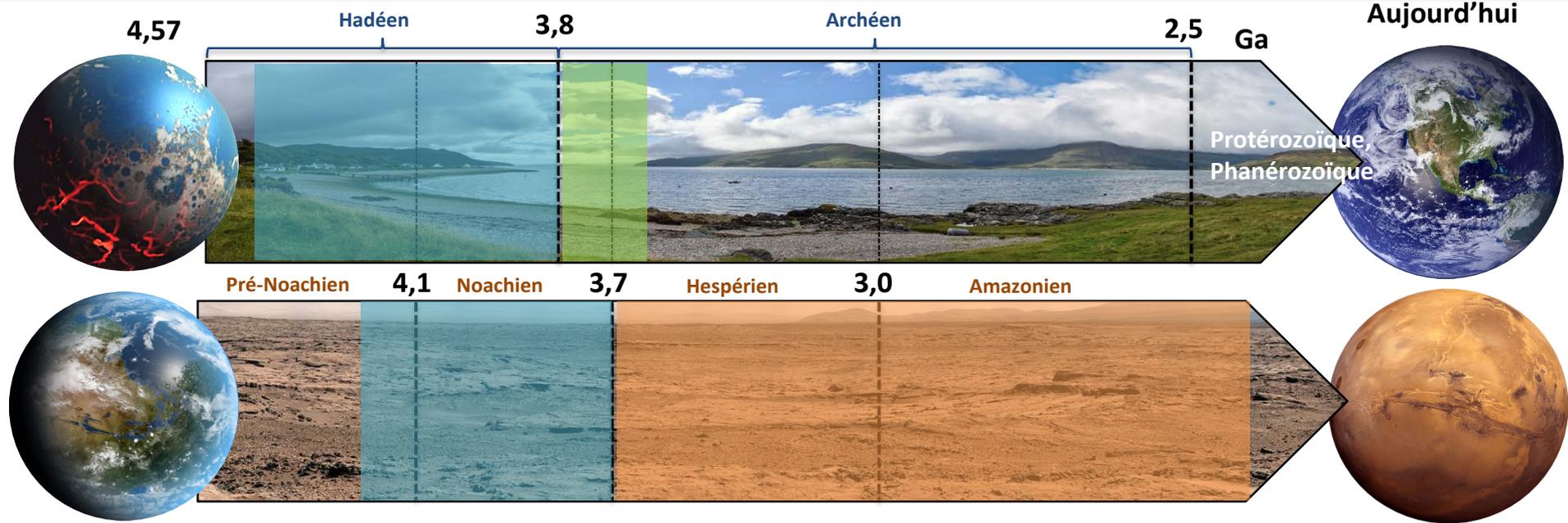
MSL (2012)
Conglomérats...

Opportunity (2004)
Pebbles





Mars et les origines de la vie



Conditions environnementales passées similaires entre Mars et la Terre

(Mojziz et al., 1996 & 2001; Schopf et al., 2002; Westall et al., 2005 & 2015)

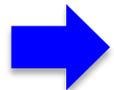


Eau liquide pérenne

(Bibring et al. 2006, Carter et al. 2010)

Sources énergétiques : Soleil, sources hydrothermales ?

Molécules organiques essentielles à la vie



Mars propice au développement d'une chimie prébiotique voire du vivant

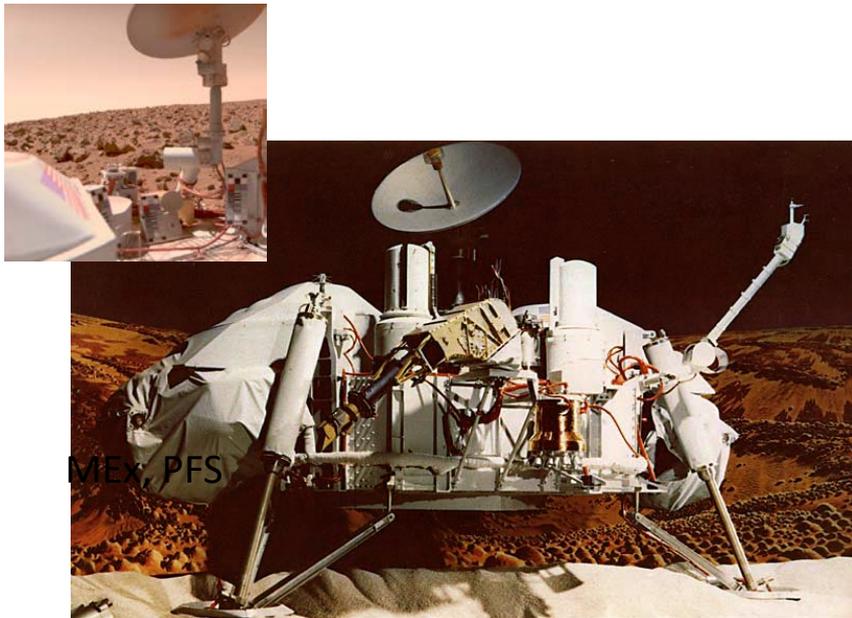


La recherche de matière organique sur Mars



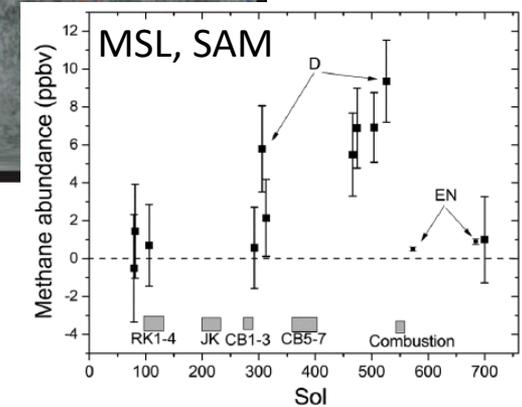
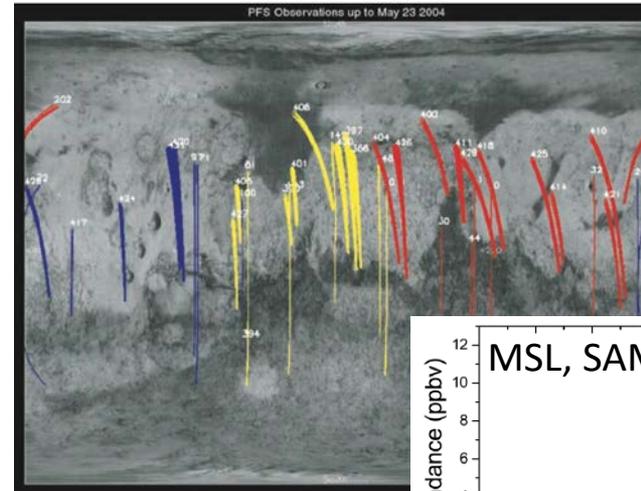
**Pas d'évidence dans le sol
(CH₃Cl et CH₂Cl₂)
(Viking, 1976)**

(Biemann et al., 1977)



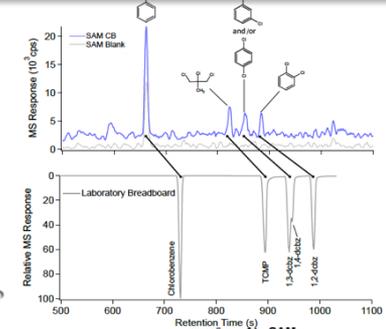
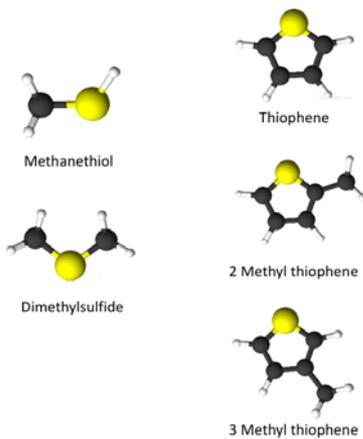
**Méthane (CH₄)
atmosphérique probablement**

(Formisano et al. 2006, Mumma et al.,
2009, Webster et al. 2014)

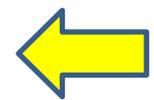




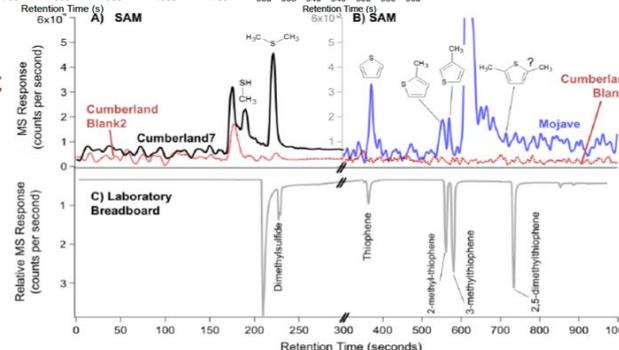
La recherche de matière organique sur Mars



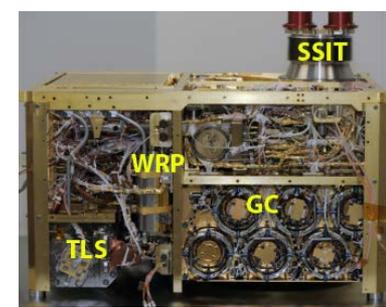
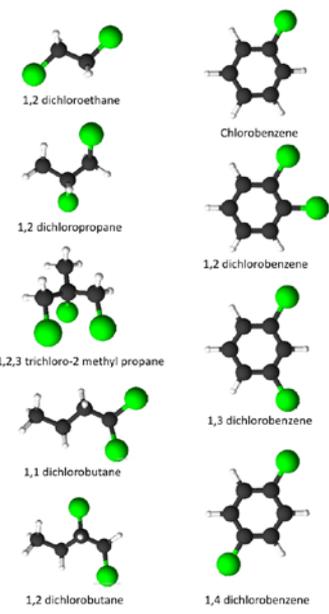
Haute T°C



Chromatogrammes de SAM comparés à des calibrations de laboratoire



Basse T°C

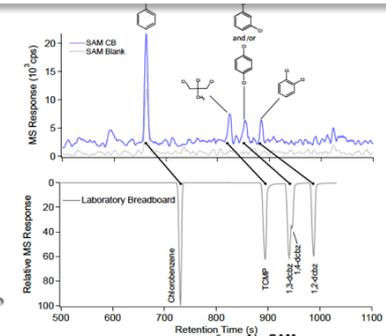
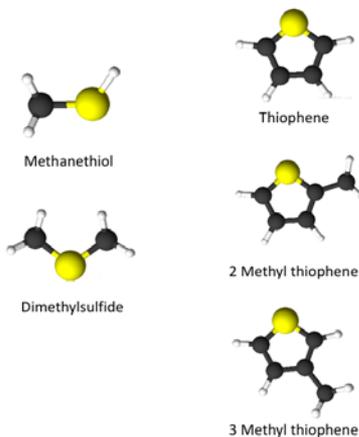


Premières détections de matière organique indigène à Mars dans le cratère Gale avec l'instrument SAM

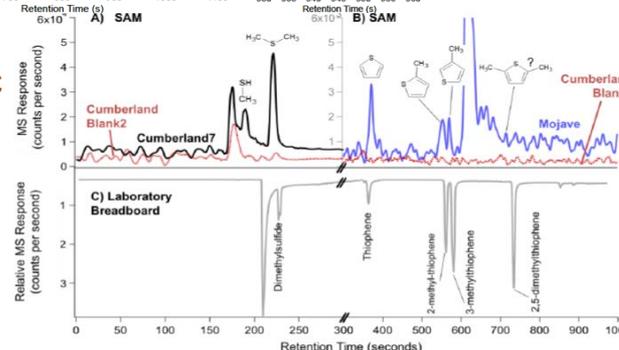
Organic molecules in the Sheepbed mudstone, Gale Crater, Mars. Freissinet *et al.* JGR 2015
 Organic matter preserved in 3-billion-year-old mudstones at Gale crater, Mars, Eigenbrode *et al.*, Science 2018



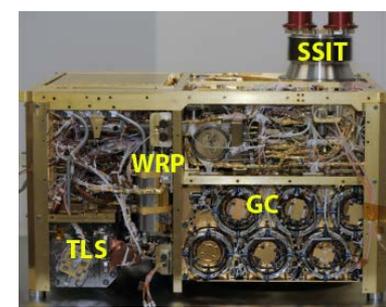
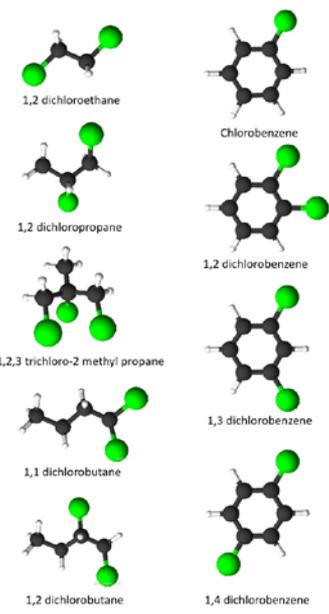
La recherche de matière organique sur Mars



Haute T°C



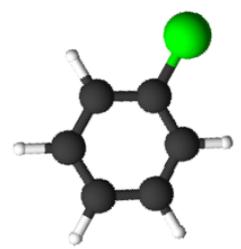
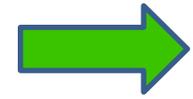
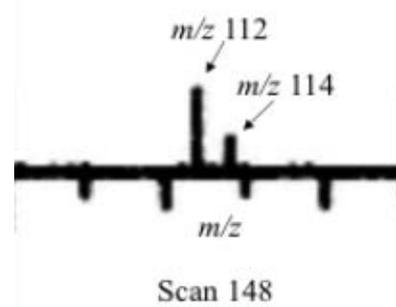
Basse T°C



Chromatogrammes de SAM comparés à des calibrations de laboratoire

Premières détections de matière organique indigène à Mars dans la cratère Gale avec l'instrument SAM

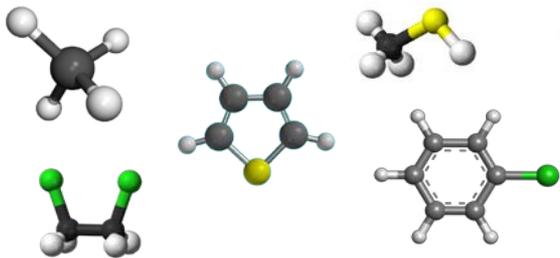
+ Les analyses GCMS de Viking auraient détecté de la MO de Mars



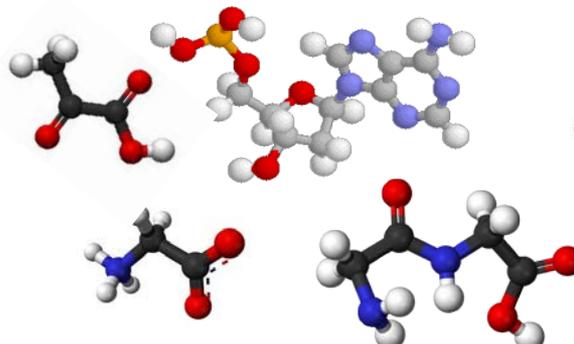
Spectre de masse obtenu à partir des données Viking



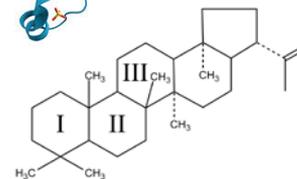
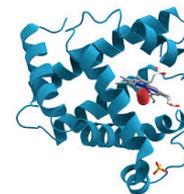
Quel bilan de la matière organique martienne ?



Molécules simples



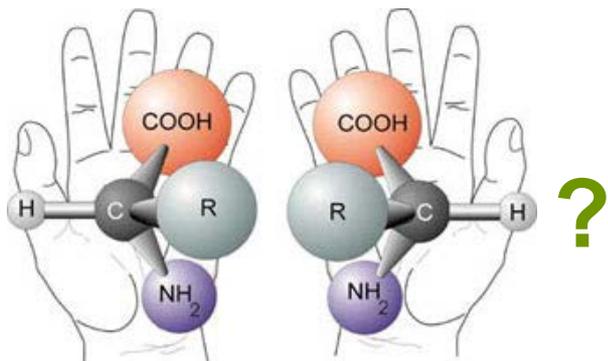
Molécules prébiotiques



Molécules biologiques



1. Evolution chimique



	Abiotique	Biotique (vie)
Acides aminés	L D	L
Glucides	L D	D

2. Homochiralité, comme indicateur d'une activité biologique

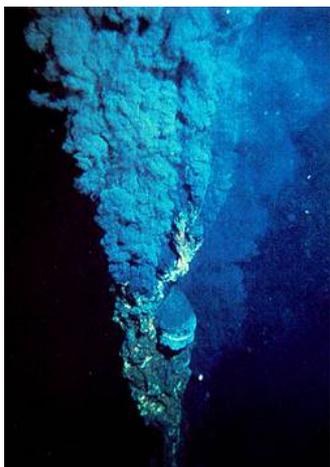


Sources abiotique de matière organique sur Mars



Sources potentielles multiples dont contemporaines (micrométéorites)

(Westall et al., 2015; Flynn, 1996)



Endogène

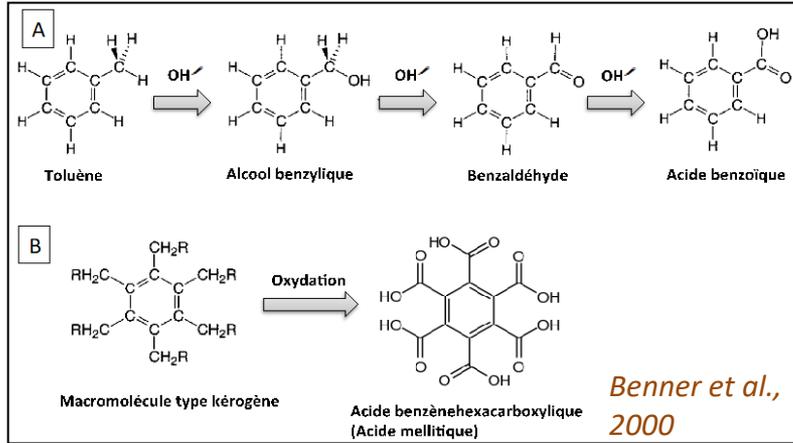


Exogène

240 T.an⁻¹ de matériel carboné
(Flynn, 1996)

Processus d'évolution de la MO identifiés

(Lasne et al., 2017, Benner et al., 2000)



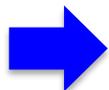
Météorites martiennes

(Steele et al., 2016)



Meteorite	Type	Age (Ga)	[C] (ppm)	δ ¹³ C (‰)
ALH 84001 ^d	O	4.1–4.43	280.0	-11.0
DaG 476 ^b	S	0.47	24.0	-15.6
DaG 476 ^c	S	0.47	6.0	-22.1
Los Angeles ^a	S	0.17	6.5	-24.3
QUE 94201 ^a	S	0.33	1.3	-23.1
Shergotty ^a	S	0.17	4.3	-19.4
SAU 130 ^a	S	0.81	19.0	-16.9
Nakhla ^c	N	1.30	26.0	-15.0 to -33.0
NWA 998 ^b	N	1.29	17.0	-24.7
Zagami ^b	S	0.18	4.0	-16.8
Zagami ^a	S	0.18	52.8	-22.7
Dhofar 019 ^a	S	0.55	109.0	-21.7
NWA 1183 ^a	S	0.19	19.7	-14.8
SAU 005 ^a	S	—	8.2	-6.4
ALH 77005 ^a	S	0.18	1.7	-21.4
LEW 88516 ^c	S	0.18	1.8	-20.2
Y 793605 ^a	S	0.21	2.6	-14.9
Chassigny ^a	C	1.34	2.1	-20.8
Tissint ^b	S	0.57	14.0	-17.8
NWA 7034 ^c	B	1.5–4.4	22.0	-23.4
Total			18 ± 26 ^c	-19.1 ± 4.5

^aGrady et al. (2004); ^bSteele et al. (2012a); ^{c,d}Full et al. (1998); ^eAgee et al. (2013); Humayun et al. (2013); O, orthopyroxenite; S, shergottite; N, nakhlite; C, chassignite; B, breccia.



Forte probabilité qu'il y ait de la MO dans le sol de Mars



Des conditions défavorables à la préservation de molécules organiques



Particules
énergétiques des
vents solaires

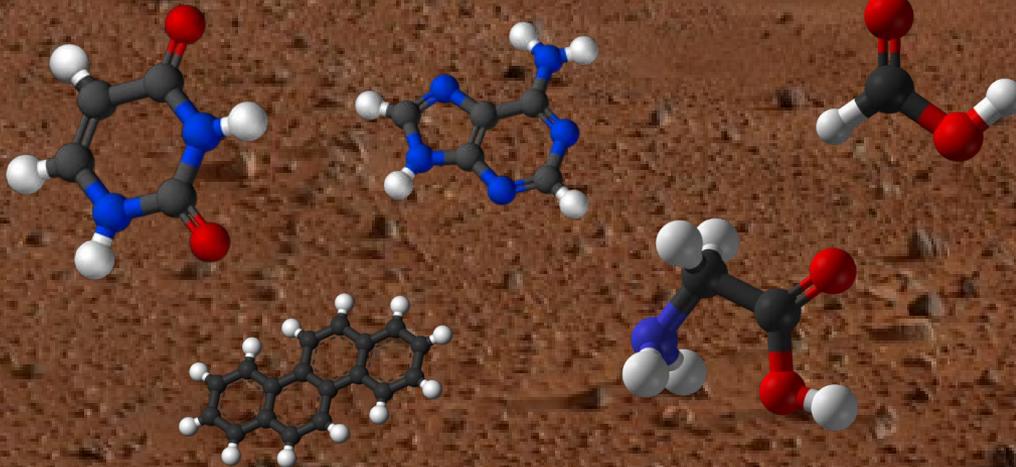
Rayonnement
cosmique

Rayonnement
UV (190-400nm)

H^+
 e^-

H^+
 e^-
 γ
 X

Plusieurs facteurs peuvent
influencer le mode de
préservation de la matière
organique.



H_2O_2 ; Fe_2O_3 ; ClO_4^-

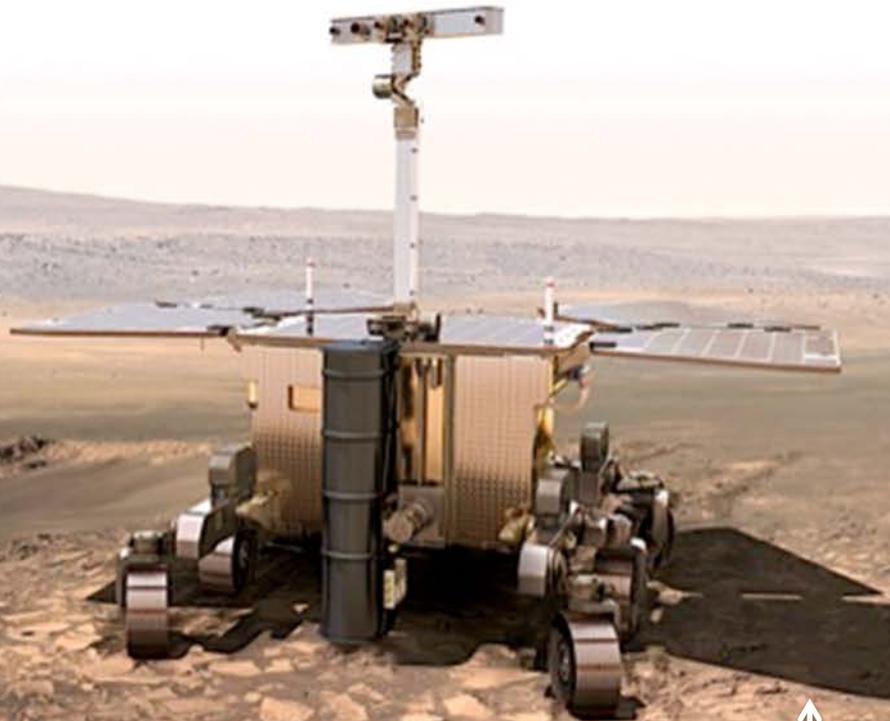
Espèces
oxydantes



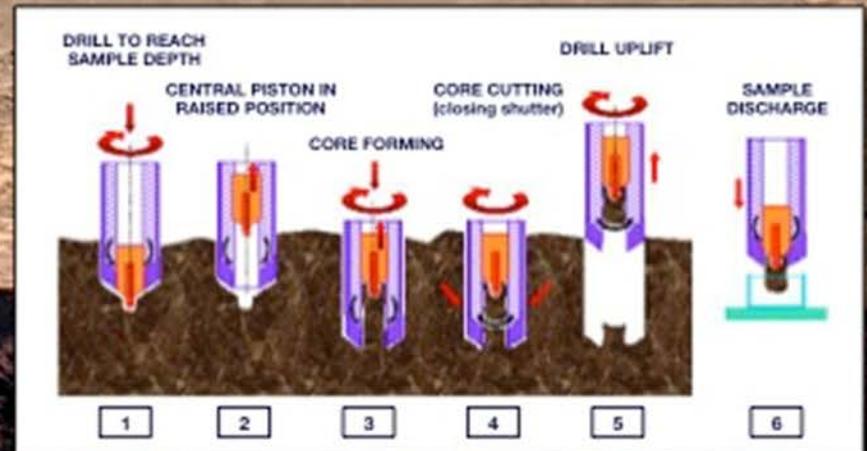
Exomars 2020 : Recherche de la matière organique en 3D

Vago et al. Astrobiology 2017

Nominal mission:	220 sols
Nominal science:	6 Experiment Cycles + 2 Vertical Surveys
EC length:	16–20 sols
Rover mass:	300-kg class
Mobility range:	Several km



2-m depth





Charge instrumentale sur Exomars 2020



Instrument Name	Description	Countries
PanCam (WAC + HRC)	Panoramic camera system	UK, D, CH F, I, A, USA H/W Sci
ISEM	IR spectrometer for bulk mineralogy identification	RUS
WISDOM	Shallow ground-penetrating radar for subsurface stratigraphy	F, D N, USA, B, I, E, UK
ADRON	Passive neutron spectrometer for subsurface water content	RUS
CLUPI on drill box	Close-Up Imager	CH, F CAN, UK, D, I, B
Ma_MISS included in 2.0-m drill	IR borehole spectrometer	I P, PL
MicrOmega	Vis+IR imaging spectrometer	F CH, RUS, I, D, UK
RLS	Raman spectrometer	E, F, UK D, NL, USA
MOMA	LD-MS + Pyr-Der GC-MS for organic molecule characterisation	D, F, USA NL, S



Mission en deux parties



→ 2016 : ExoMars Trace Gas Orbiter

Etudes de l'environnement de la surface de Mars et notamment la composition et l'évolution de l'atmosphère

Démonstration d'atterrissage des futures missions européennes

Communication Terre-Mars avec le rover d'Exomars 2020



→ 2020 : Rover

Mission à objectif exobiologique

Analyses d'échantillons prélevés en 3D

Recherche de matière organique passée et actuelle en fonction de la profondeur

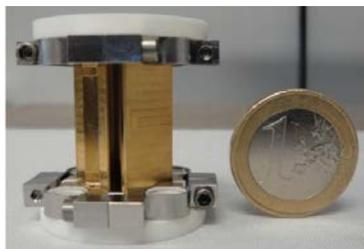
Profil vertical de la composition en eau

Déterminer les échantillons de sous surface les plus pertinents pour le Mars Sample Return

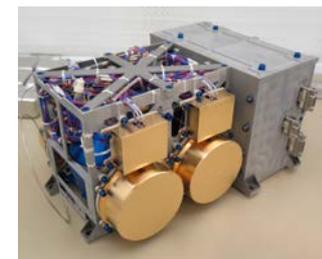
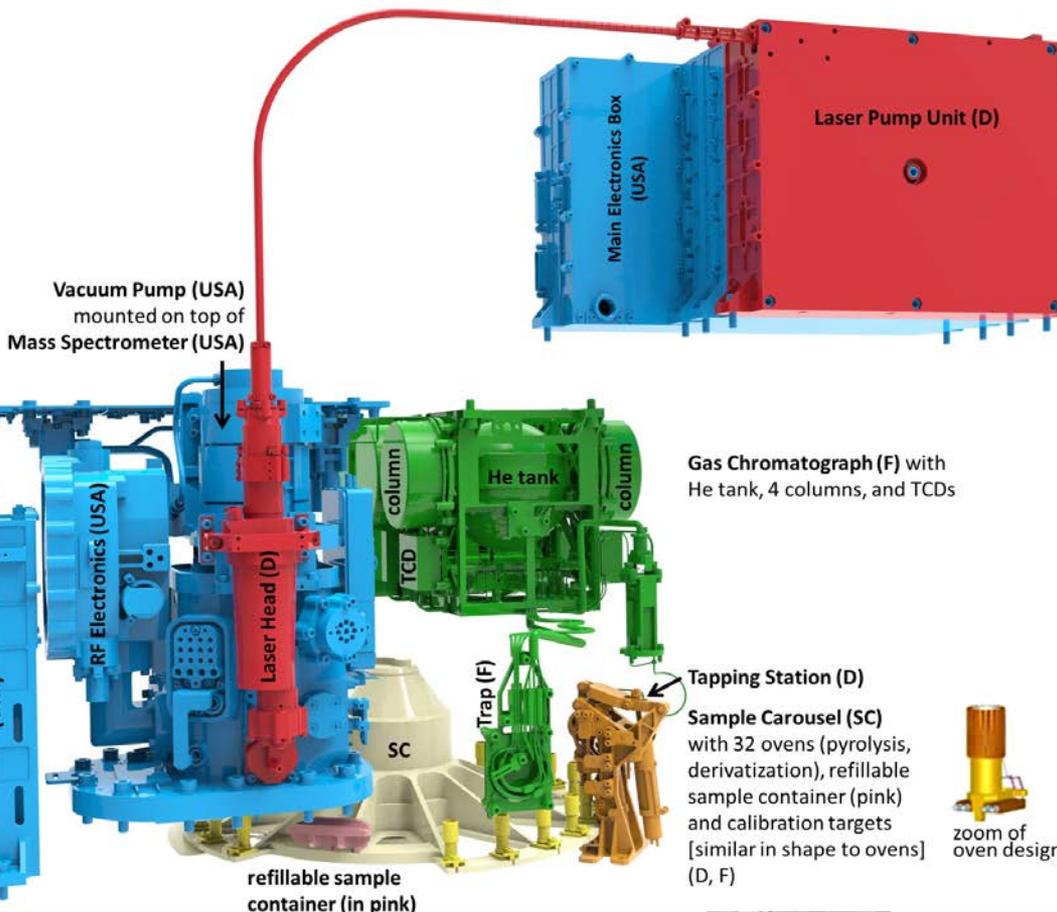




MOMA



Ion Trap mass spectrometer



Gas chromatograph



Laser

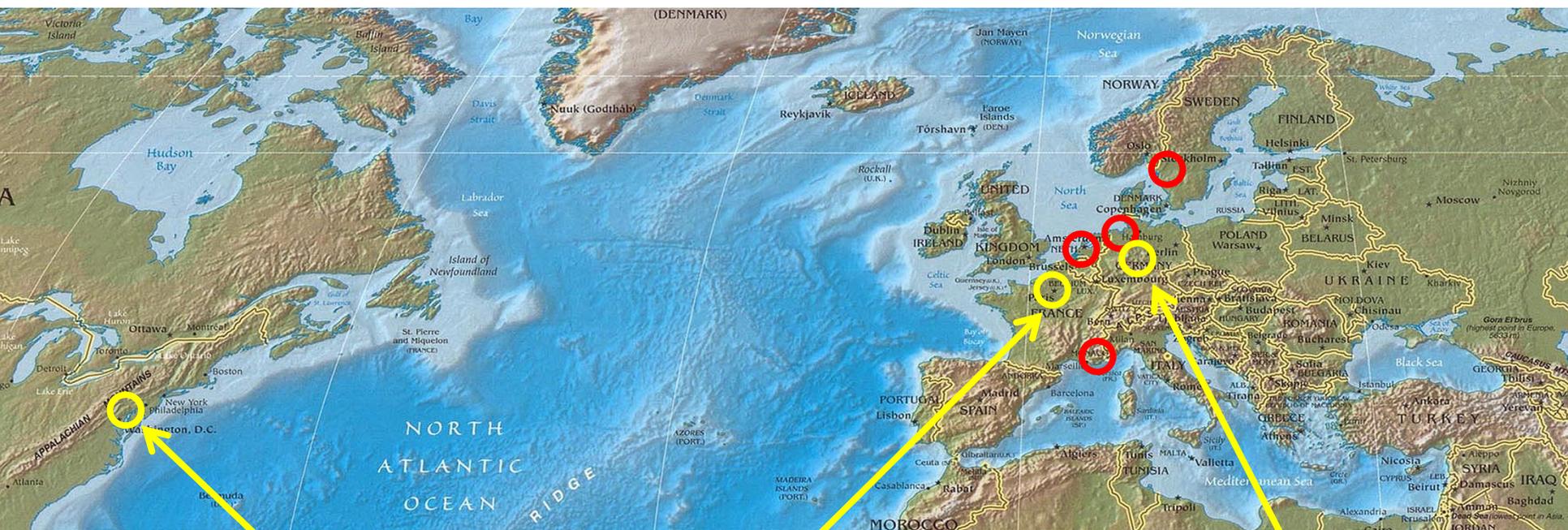


Tapping station/four

The Mars Organic Molecule Analyzer (MOMA) Instrument, Goesmann *et al. Astrobiology*. 2017.



Equipes impliquées dans MOMA



Spectromètre de Masse et
électroniques
NASA Goodard Space Flight Center

Chromatographe en
Phase Gazeuse
Laboratoire Atmosphères Milieux
et Observations Spatiales
(LATMOS) et Laboratoire
Interuniversitaire des Systèmes
Atmosphériques (LISA)

Laser, four et tapping station
Max-Planck-Institut für
Sonnensystemforschung et the
Laser Zentrum Hannover

○ Supporting Teams (Science)



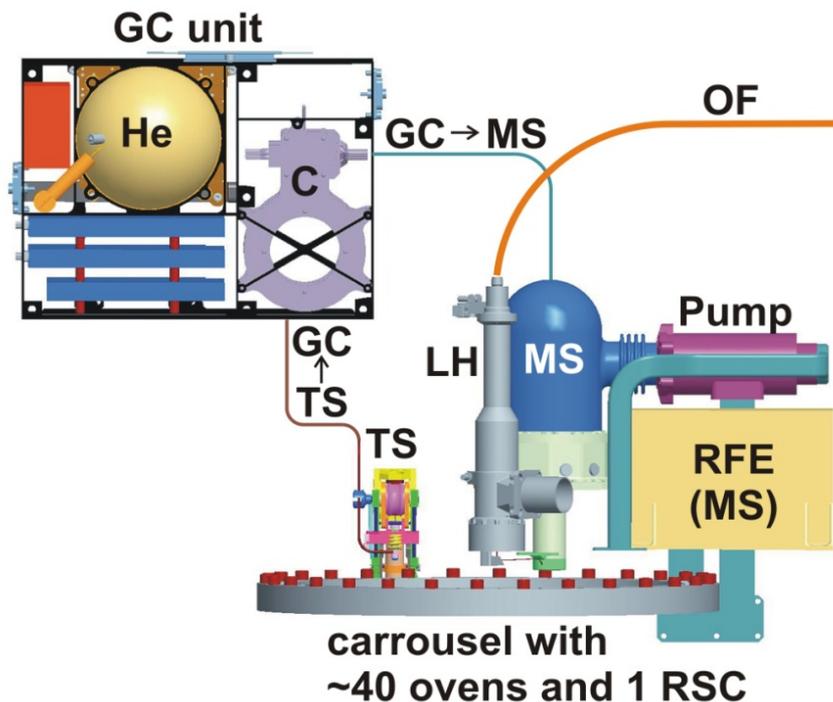
Schéma de fonctionnement de MOMA



Principal objectif : Détecter, identifier et quantifier la matière organique (incluant les énantiomères) présente sur Mars (surface, sous-surface)

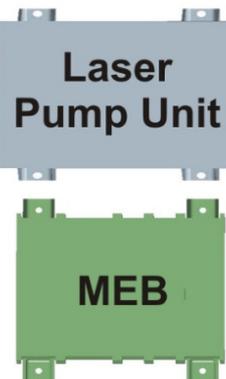
GC : Gas Chromatograph

Séparation des espèces volatiles



LID : Laser

Desorption/ionisation des échantillons



MS : Mass Spectrometer

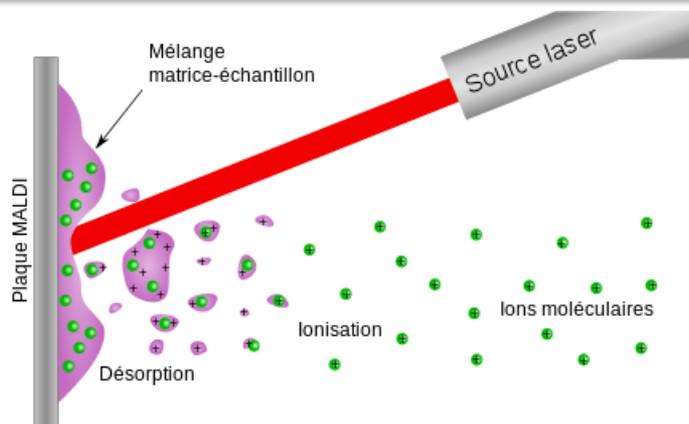
Identification moléculaire et quantification des espèces gazeuses

TS : Tapping Station

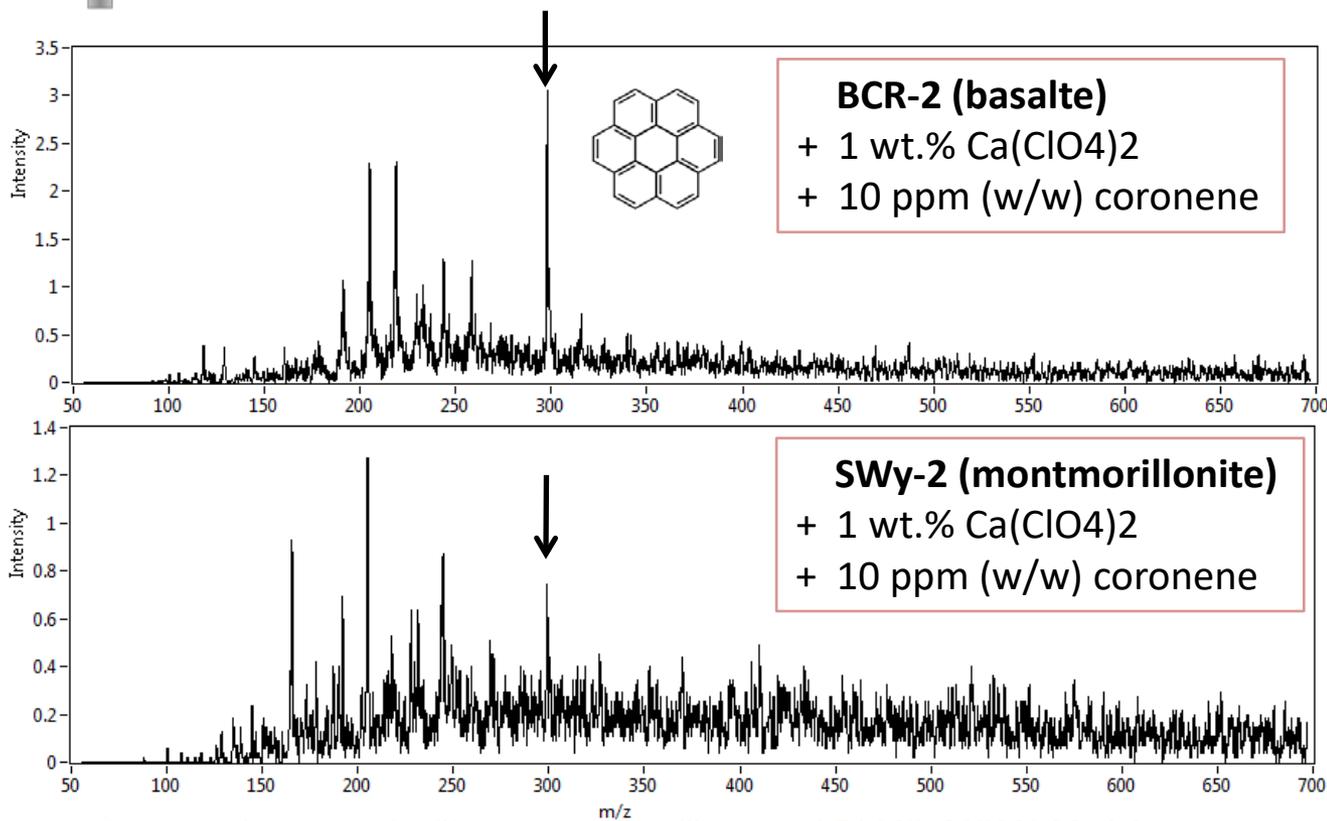
Préparation des échantillons (pyrolyse, extraction chimique)



MOMA-LID



Cibles : macromolécules, et distributions moléculaires spécifiques (répétition...)



BCR-2 (basalte)
 + 1 wt.% Ca(ClO₄)₂
 + 10 ppm (w/w) coronene



Basalte (roche primaire)



SWy-2 (montmorillonite)
 + 1 wt.% Ca(ClO₄)₂
 + 10 ppm (w/w) coronene



Smectite argile



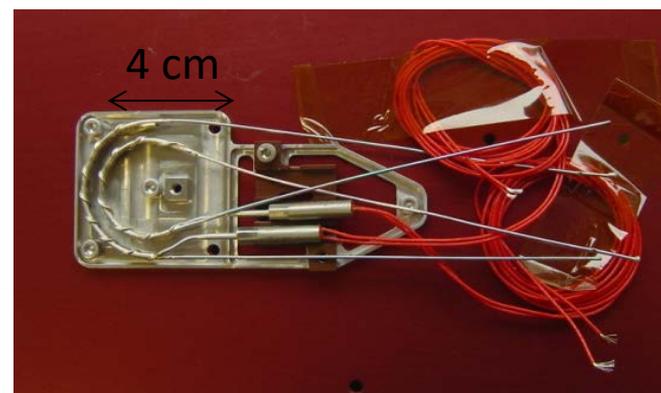
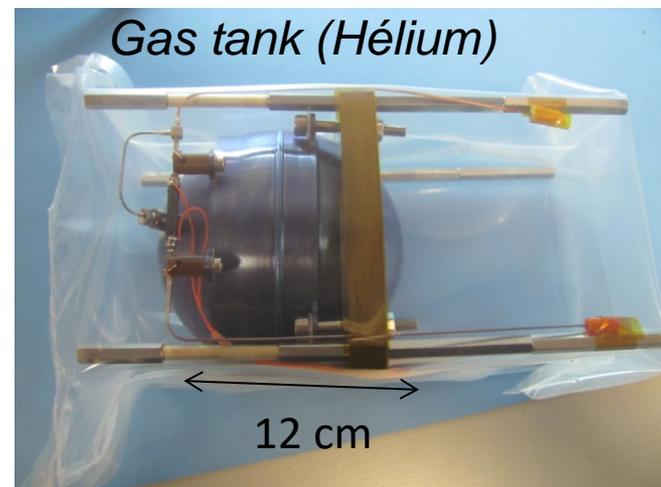
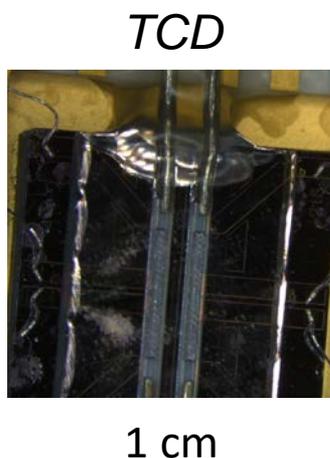
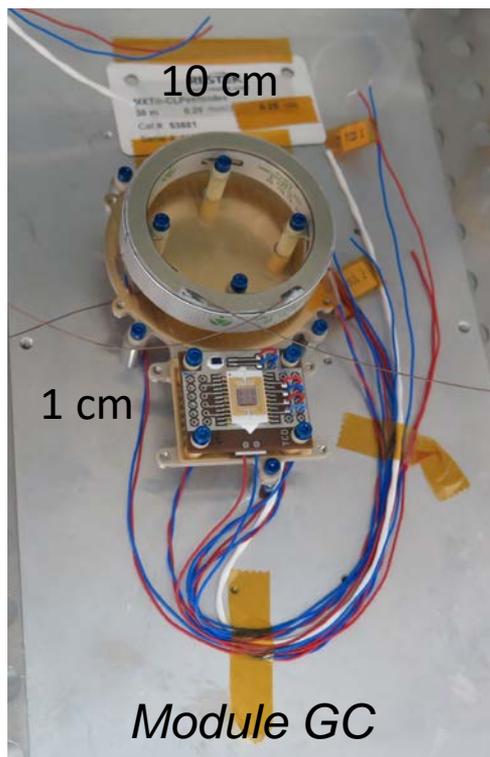
Spectres de masse de différents échantillons par LDI-MS (MOMA Modèle)



MOMA-GC



Objectif : Séparer des espèces chimiques volatiles par pyrolyse ou par extraction chimique d'échantillons solides afin de les identifier et quantifier

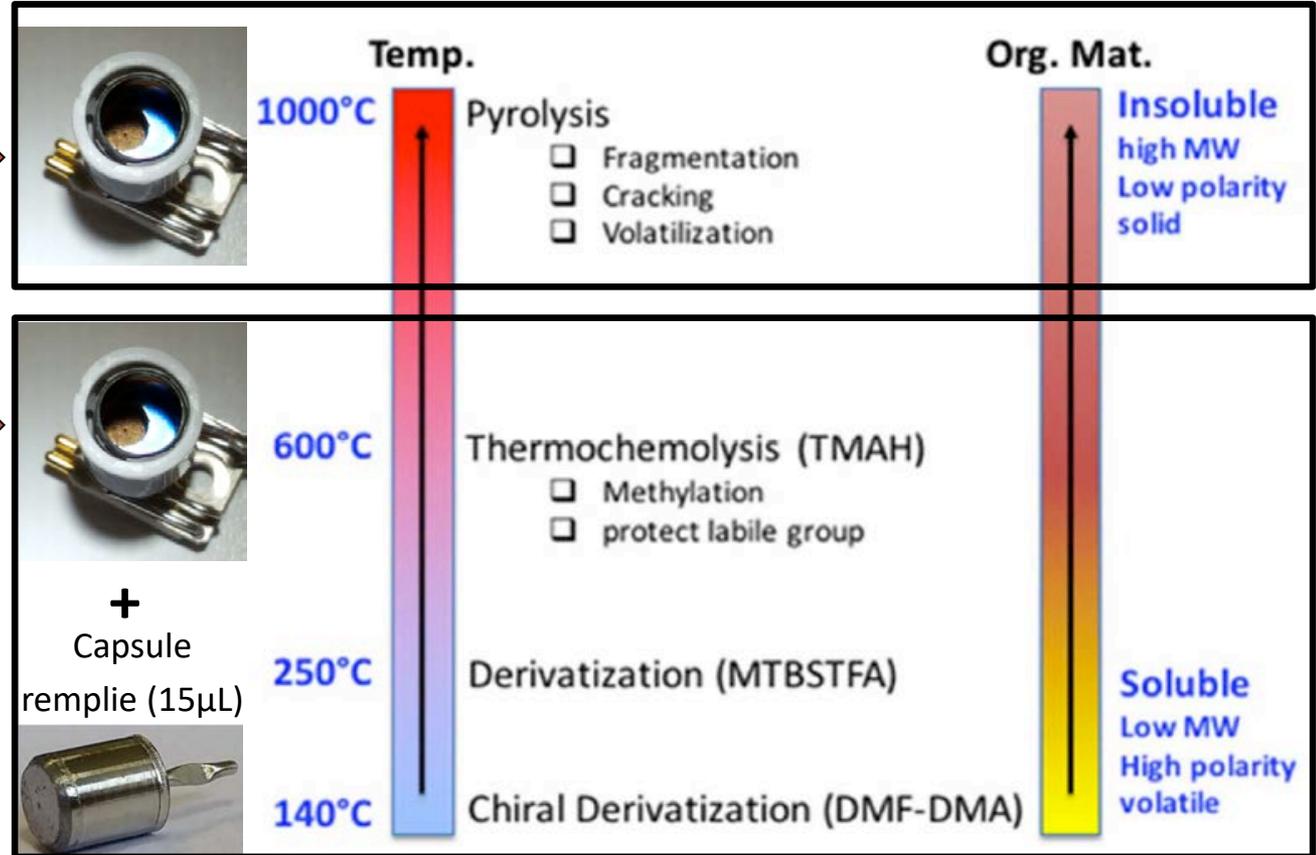
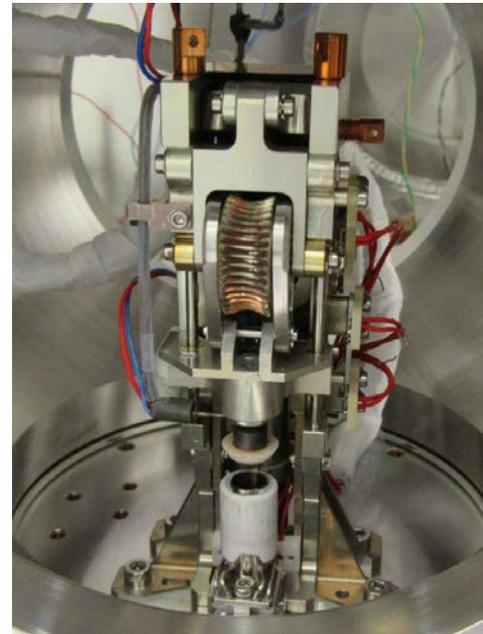


Injection trap X2 (Tenax GR)

NAME M ≡ Metal	Length (m)	ID (mm)	df (μm)	Rationale
MXT-5	20	0.25	0.25	C ₄ -C ₂₅ organic molecules
MXT-CLP	20	0.25	0.25	C ₄ -C ₂₅ organic molecules
MXT-Q BOND	20	0.25	10	C ₁ -C ₅ organic and inorganic molecules
CP-Chirasil Dex CB	20	0.25	0.25	Organic enantiomers



MOMA-TS



Capsule utilisée



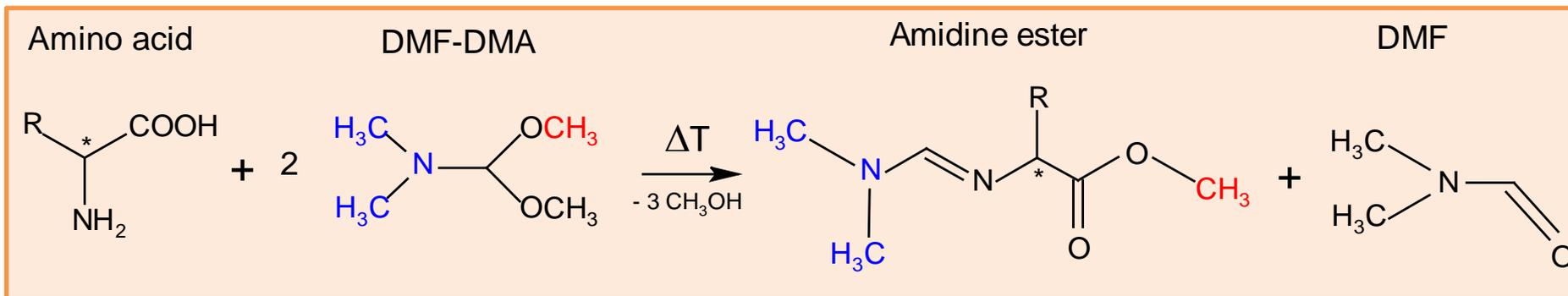


Exemple de l'extraction chimique au DMF-DMA



Cibles : Acides carboxyliques, acides aminés, bases azotés, Amines, Alcools, Sucres...

	Avantages	Inconvénients
DMF-DMA	<ul style="list-style-type: none">♦ Réaction rapide en une seule étape♦ Produits de faibles poids moléculaire♦ Analyses courtes	<ul style="list-style-type: none">♦ Produits secondaires♦ Reproductibilité

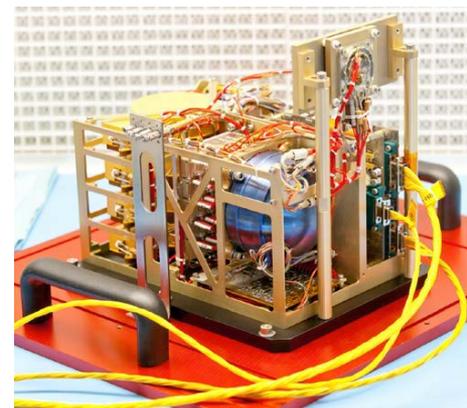


Réaction chimique qui protège les centres asymétriques des molécules dérivatisées et préserve un éventuel excès énantiomérique

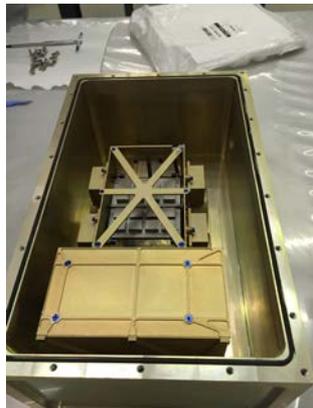
Permet de contraindre la nature et l'origine des molécules organiques qui seront potentiellement détectées à la surface de Mars



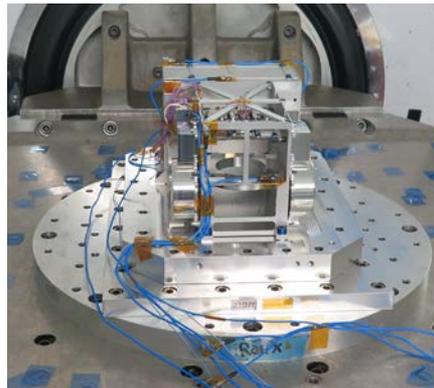
Modèles MOMA-GC : attraper les tous !!!



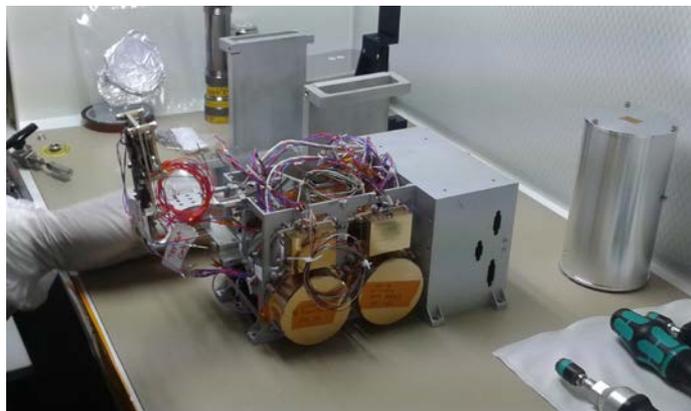
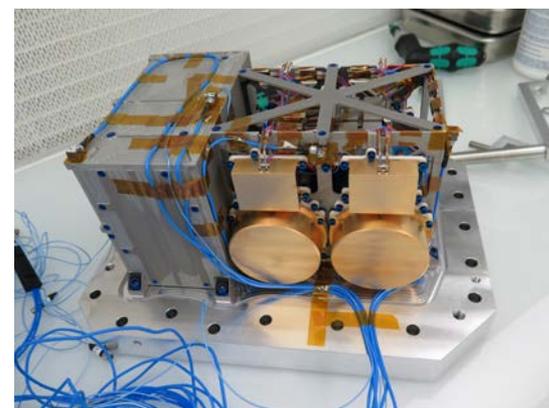
GC prototype : faisabilité, démonstrateur



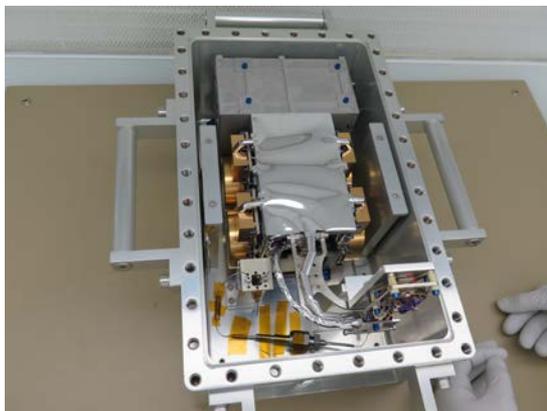
*STM 1&2: Structural and Thermal Model
Vibré et choqué, livrable pour tests
d'intégration, non fonctionnel
analytiquement*



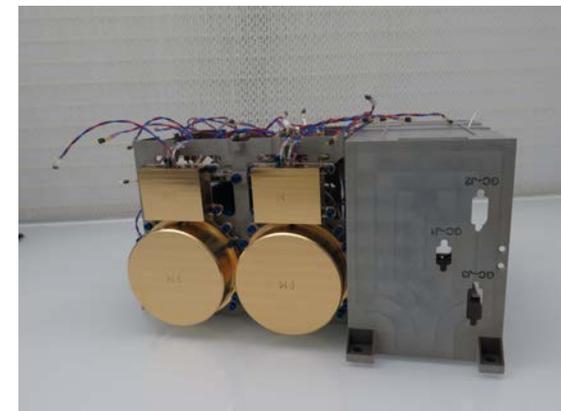
*QSM : Qualification Simulator Model
Livrable pour vérification du niveau de
contamination de la chaîne de préparation
et de distribution de l'échantillon, non
fonctionnel analytiquement*



*ETU : Engineering Test Unit - tests
analytiques en laboratoire et couplage*



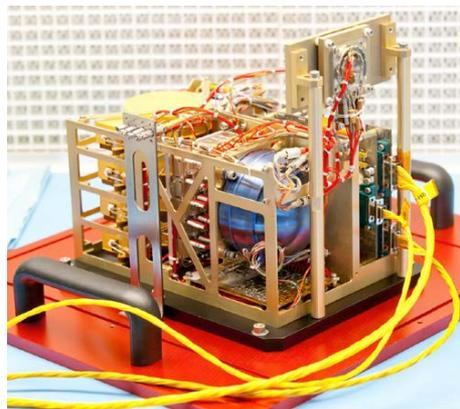
*FS : Flight Spare – intégration sur
un testbed identique à MOMA*



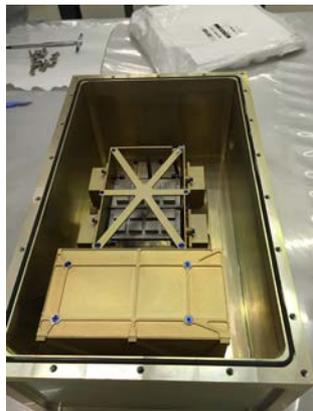
*FM : Flight Model – l'heureux
gagnant pour Mars*



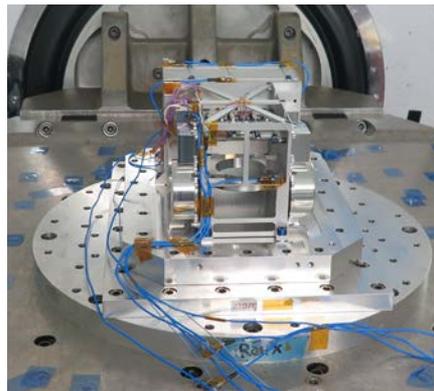
Modèles MOMA-GC : attraper les tous !!!



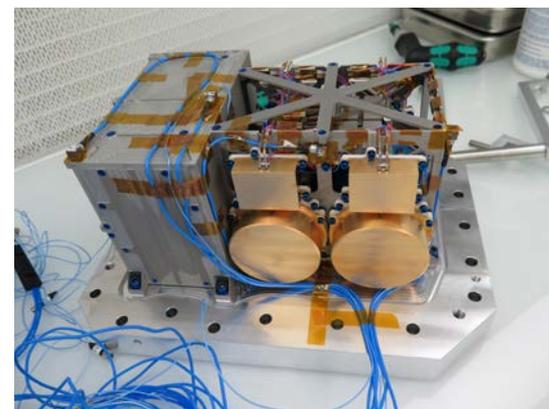
GC prototype : faisabilité, démonstrateur



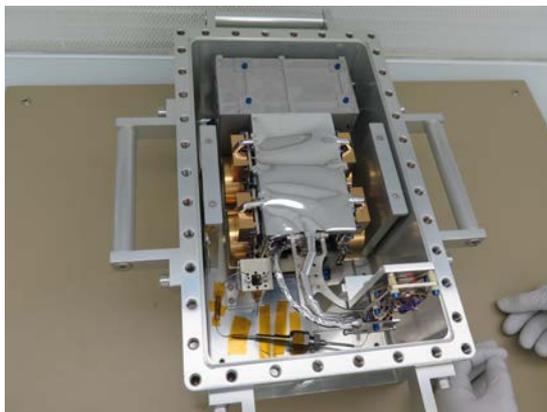
*STM 1&2: Structural and Thermal Model
Vibré et choqué, livrable pour tests
d'intégration, non fonctionnel
analytiquement*



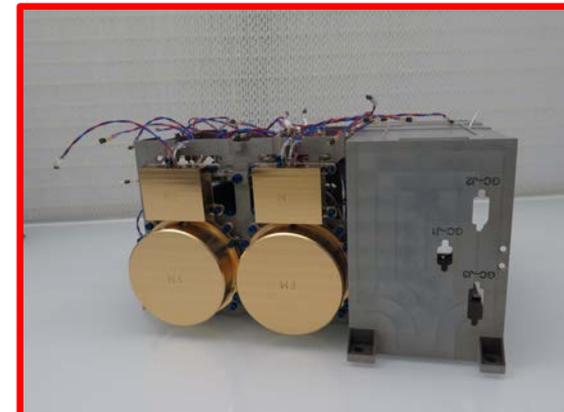
*QSM : Qualification Simulator Model
Livrable pour vérification du niveau de
contamination de la chaîne de préparation
et de distribution de l'échantillon, non
fonctionnel analytiquement*



*ETU : Engineering Test Unit - tests
analytiques en laboratoire et couplage*



*FS : Flight Spare – intégration sur
un testbed identique à MOMA*



*FM : Flight Model – l'heureux
gagnant pour Mars*

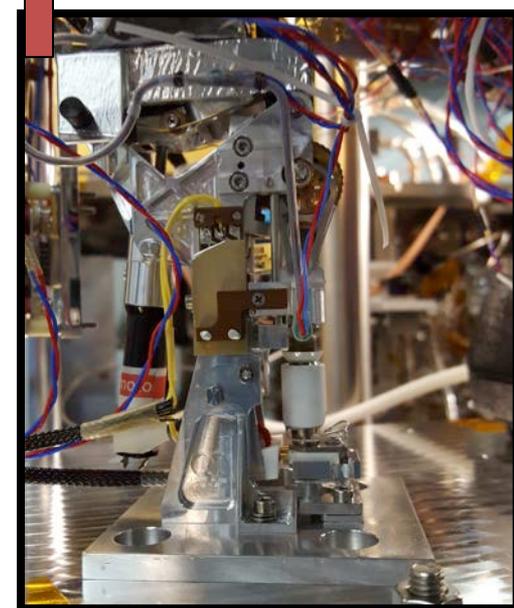
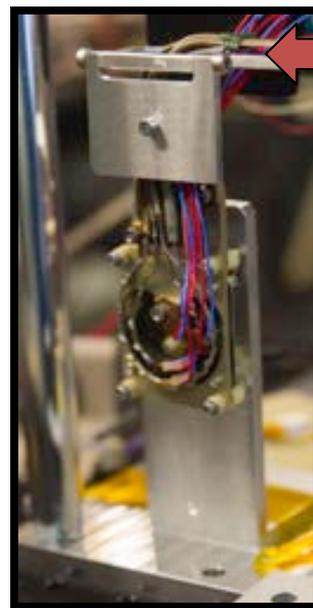
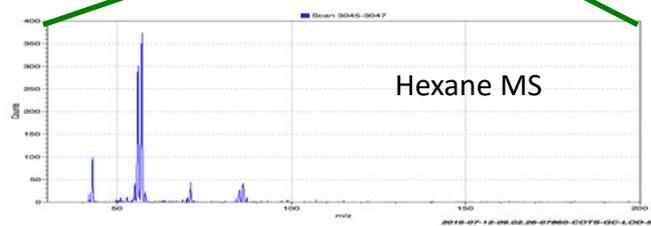
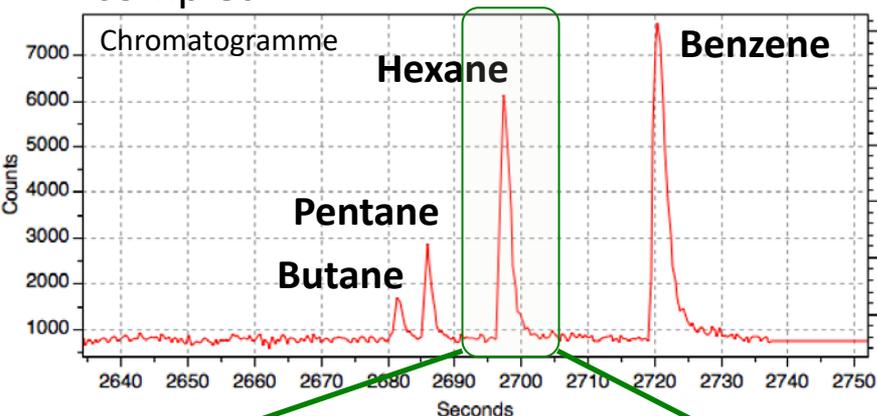
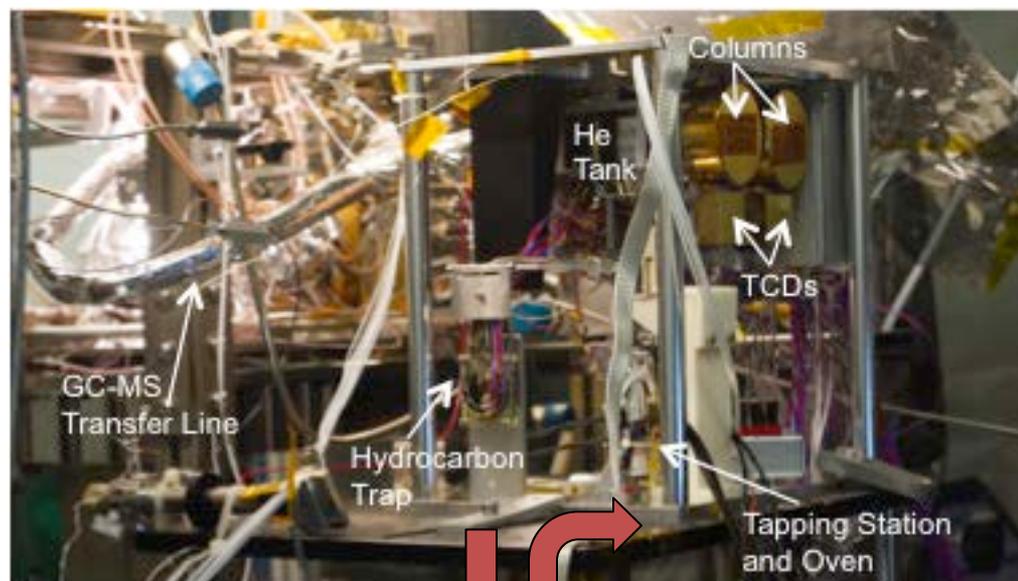


Campagne de couplage MOMA-ETU



Chaque année depuis 2013, les différents modèles ETU (TS-GC-MS) de MOMA sont couplés au GSFC :

- Tests de l'électronique et des scripts qui contrôlent le hardware MOMA
- Tests analytiques tant opérationnels (température, fluide, pression...) que l'acquisition et le traitement de données sur des mélanges « simples »
- End-to-end performance du couplage complet





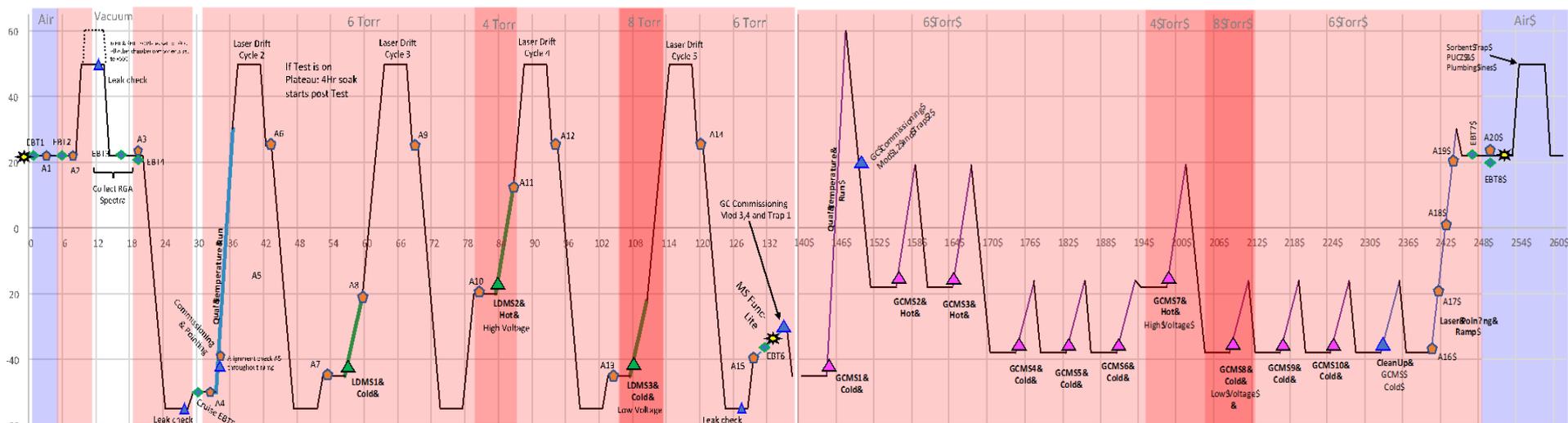
Campagne de couplage MOMA-FM



Fin 2017-début 2018, campagnes de vérifications et de calibrations du modèle FM de MOMA en chambre martienne à différentes températures opérationnelles (froid à -45°C et chaud -20°C) et différentes pression à la surface de Mars (4 Torr à 8 Torr)

Tests basés sur les données collectées avec l'ETU

Uniquement des tests « simples » avec un mélange gazeux d'hydrocarbures pour éviter toute contamination durable



Cycles LDMS et calibration de la cible laser

Cycles GCMS



Etats des lieux



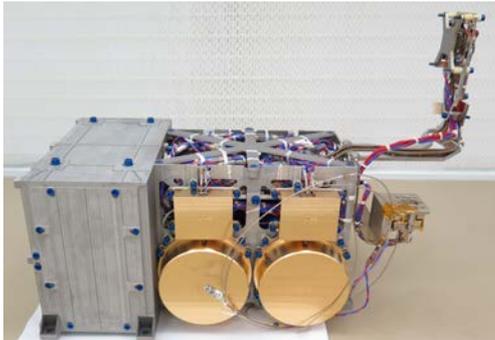
Livraison en cours de tous les instruments FM (le GC est le premier à avoir été livré !!!) pour intégration



Transfert balistique direct prévu à l'été 2020 (fenêtre de 20 jours entre fin juillet – début aout)



Arrivée programmée le 19 Mars 2021, fin de mission nominale prévue le 29 octobre 2021



Proton M /
Breeze M



Merci aux collaborateurs (NASA/GSFC, MPS Lindau) et aux équipes françaises (LATMOS, LISA, Centrale)

