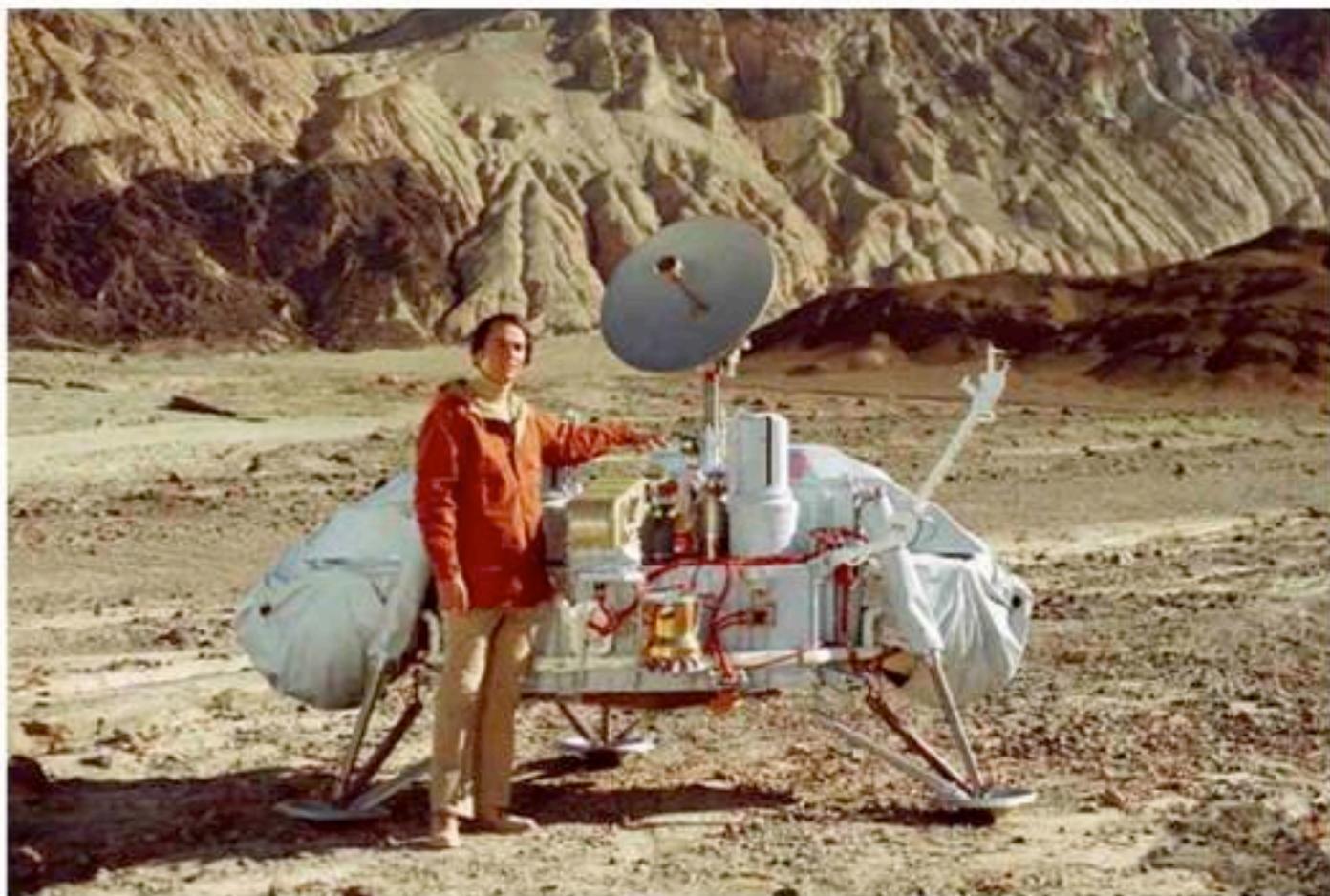


L'exploration de Mars par Curiosity : le laboratoire analytique SAM

Michel Cabane
LATMOS
et l'équipe SAM-France
(LATMOS/UPMC, LATMOS/UVSQ, LISA/UPEC,
LISA/Paris-Diderot, LGPM/ECP)

Historique et ACP/Titan



Carl Sagan et une maquette 1/1 de Viking

VIKING / Mars

1969 – 1976 - 1983

Historique et ACP/Titan

1975

- **M. Cabane (LPDA/ParisVI)**

- LPDA — STEP(CEA)
aérosols – phys.at.- ions (MS)
- LPDA — SA
Nuages/Vénus (Pioneer)
Vents/Vénus (Venera)

- **G. Israël (SA/CNRS)**

- SA — STEP(CEA)
Malachit (VEGA-1)
- Aérosols et nuages dans
l'atmosphère de Vénus
Analyse in-situ

- **F. Raulin (LPCE/ParisXII)**

- Chimie prébiotique
- Cornell (C. Sagan)
- Michigan U. (C Ponnanperuma)
- 1982 : 'Organic Synthesis from
 $\text{CH}_4\text{-N}_2$ atm : the case for Titan' *

- **D. Gautier (LESIA/ObsParis Meudon + Europe, ESA, + US, NASA) → Saturne Titan**

Gautier, D, F Raulin, WH Ip : Exobiology and the
Solar System : The Cassini mission to Titan. **

1985

* In 'Origins of Life', 1982, Springer. ** In 'Origins of Life', 1984, Springer.

Historique et ACP/Titan

1975

- **M. Cabane (LPDA/ParisVI)**
 - LPDA — STEP(CEA)
Aérosols-Ions (MS)
 - LPDA-SA
Nuages/Vénus (Pioneer)
 - Vents/Vénus (Venera)
- **G. Israël (SA/CNRS)**
 - SA — STEP(CEA)
Malachit (VEGA-1)
 - Aérosols et nuages dans l'atmosphère de Vénus
 - Analyse in-situ
- **F. Raulin (LPCE/ParisXII)**
 - Chimie prébiotique
 - Cornell (C. Sagan)
 - Michigan U. (C Ponnampерuma)
 - 1982 : 'Organic Synthesis from CH₄-N₂ atm : the case for Titan'
- **D. Gautier (LESIA/ObsParis Meudon + Europe, ESA, + US, NASA) → Saturne Titan**

Gautier, D, F Raulin, WH Ip : Exobiology and the Solar System : The Cassini mission to Titan.

1985

SA + LPCE + LPDA-LM : Collecte et pyrolyse d'aérosols lors de la descente de la sonde Titan

INSTRUMENT ACP (AEROSOL COLLECTOR AND PYROLYZER) soutien CNES

G. ISRAEL (SA), M. CABANE (LPDA, Lab Météo), F. RAULIN (LPCE)

J-F Brun (SA/CNRS)

Modélisation, tests en laboratoire, expériences de labo (SA LPCE)

Historique et ACP/Titan

1975

- **M. Cabane (LPDA/ParisVI)**

- LPDA — STEP(CEA)
Aérosols-Ions (MS)
- LPDA-SA
Nuages/Vénus (Pioneer)
- Vents/Vénus (Venera)

- G. Israël (SA/CNRS)**

- SA — STEP(CEA)
Malachit (VEGA-1)
- Aérosols et nuages dans
l'atmosphère de Vénus
- Analyse in-situ

- F. Raulin (LPCE/ParisXII)**

- Chimie prébiotique
- Cornell (C. Sagan)
- Michigan U. (C Ponnampерuma)
- 1982 : 'Organic Synthesis from
 $\text{CH}_4\text{-N}_2$ atm : the case for Titan'

•

Cassini – Huygens

Saturne Titan

1988 NASA ESA

J-P Lebreton

1988

SA + LPCE + LPDA-LM : Collecte et pyrolyse d'aérosols lors de la descente de Huygens

INSTRUMENT ACP (AEROSOL COLLECTOR AND PYROLYZER) * soutien CNES

G. ISRAEL (SA), M. CABANE (LPDA, Lab Météo), F. RAULIN (LPCE)

J-F Brun (SA/CNRS)

Modélisation, tests en laboratoire, expériences de labo (SA LPCE)

* At EGU Bologne 1988

Historique et ACP/Titan

1975

- M. Cabane (LPDA/ParisVI)

- LPDA — STEP(CEA)

- Aérosols-Ions (MS)

- LPDA-SA

- Nuages/Vénus (Pioneer)

- Vents/Vénus (Venera)

- G. Israel (SA/CNRS)

- SA — STEP(CEA)

- Malachit (VEGA-1)

- Aérosols et nuages dans l'atmosphère de Vénus

- Analyse In-situ

- F. Raulin (LPCE/ParisXII)

- Chimie prébiotique

- Cornell (C. Sagan)

- Michigan U. (C Ponnannarperuma)

- 1982 : 'Organic Synthesis from CH₄-N₂ atm : the case for Titan'

1988

1988

Cassini – Huygens

Saturne Titan

NASA ESA

J-P Lebreton

INSTRUMENT ACP (AEROSOL COLLECTOR AND PYROLYZER) sélectionné ESA, financé CNES

G. ISRAEL PI , M. CABANE Col (adjoint au PI), F. RAULIN Co-I, IDS/HUYGENS

J-F Brun (SA/CNRS)

D. Coscia

E. Lorigny

F. Rocard (CNES)

C. Mignon (CNES)

1997

Historique et ACP/Titan

1975

- M. Cabane (LPDA/ParisVI)

- LPDA — STEP(CEA)
Aérosols-Ions (MS)
- LPDA-SA
Nuages/Vénus (Pioneer)
- Vents/Vénus (Venera)

- G. Israel (SA/CNRS)

- SA — STEP(CEA)
Malachit (VEGA-1)
- Aérosols et nuages dans
l'atmosphère de Vénus
- Analyse in-situ

- F. Raulin (LPCE/ParisXII)

- Chimie prébiotique
- Cornell (C. Sagan)
- Michigan U. (C Ponnanperuma)
- 1982 : 'Organic Synthesis from
 $\text{CH}_4\text{-N}_2$ atm : the case for Titan'

1988

Cassini – Huygens

Saturne Titan

NASA ESA

J-P Lebreton

1988

INSTRUMENT ACP (AEROSOL COLLECTOR AND PYROLYZER) sélectionné ESA, financé CNES

G. ISRAEL PI, M. CABANE Col (adjoint au PI), F. RAULIN Co-I, IDS/HUYGENS

Développement de l'instrument (SA) (J-F Brun (SA/CNRS), D. Coscia, E. Lorigny, ...)

Modélisation, tests en laboratoire, expériences de labo (SA LISA) (thèse P. Coll)

1997

Historique et ACP/Titan

1988-1997 : ACP pour la sonde atmosphérique HUYGENS :

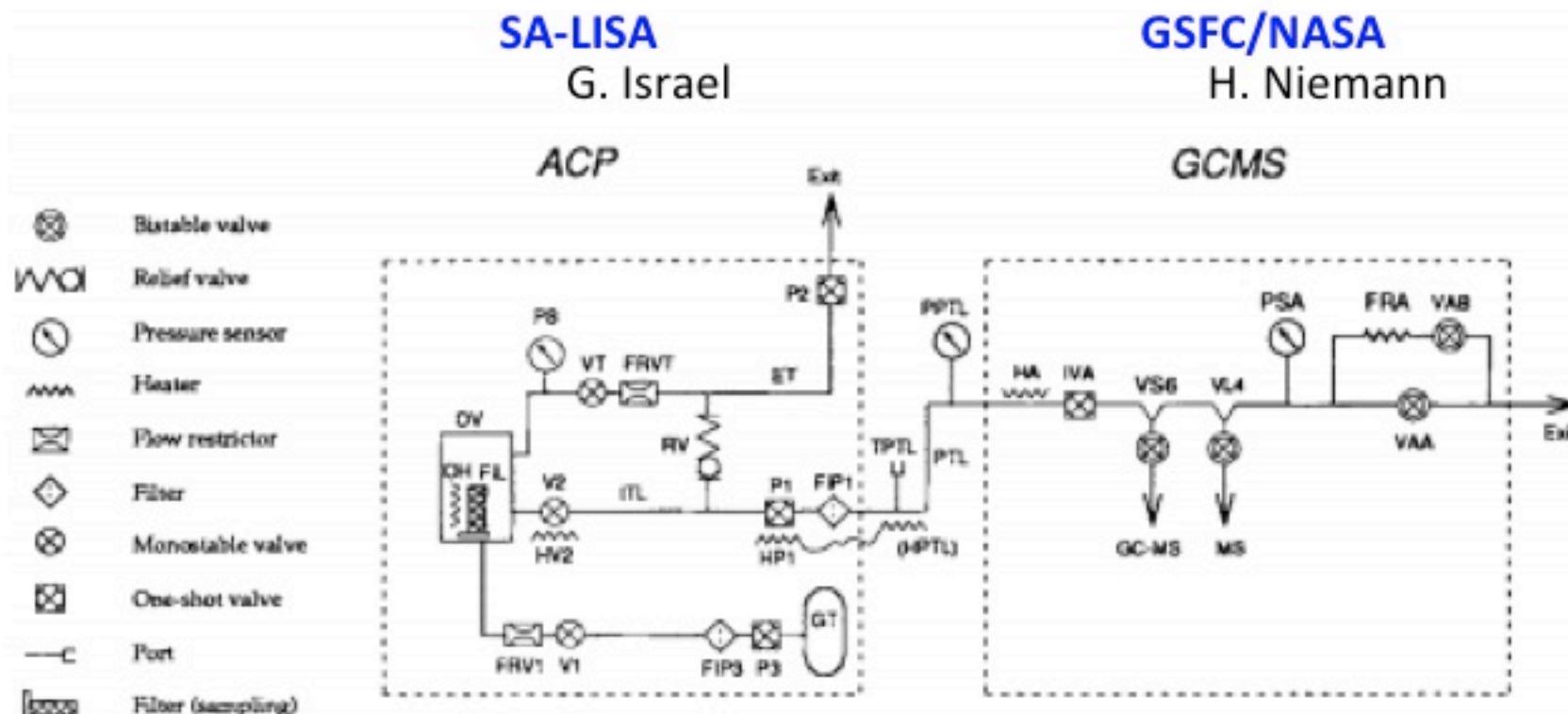


Figure 6. Schematic of the ACP-GCMS transfer interface.

CASSINI : départ de Terre 1997 _ Arrivée à Titan 2005

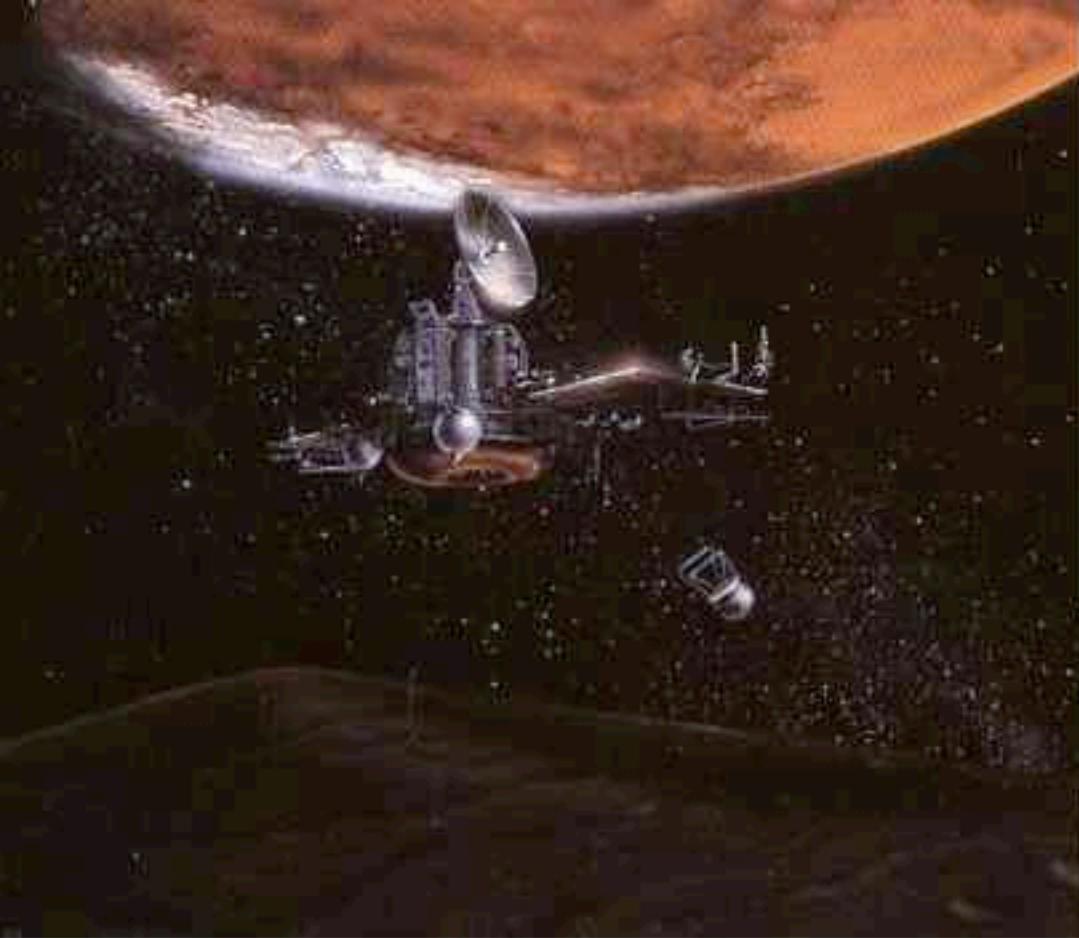


Image prise à 430 km

**1988-89 : IKI
PHOBOS_1 , PHOBOS_2**

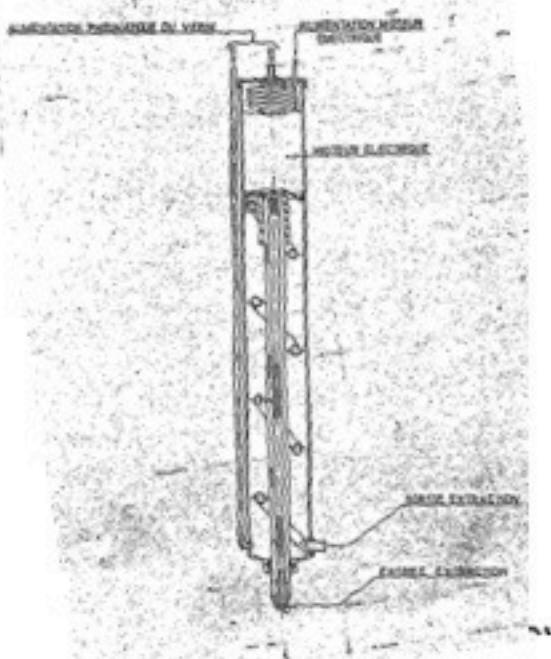
(C) IKI AH CCCP 4060C 25:03:89



Etude du sol de Mars

Atelier de Planéto. comparée
LaLonde Les Maures 1988

Forage et
prélèvement



MICRO-ECHANTILLONNAGE DU SOL DE MARS POUR L'ANALYSE CHIMIQUE IN-SITU

G. ISRAEL⁽¹⁾

M. CABANE⁽²⁾

R. SALOME⁽³⁾

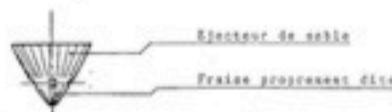
G. SORBA, O. DARNIS⁽⁴⁾

(1) Service d'Aéronomie du CNRS, Verrières-le-Buisson

(2) Laboratoire de Météorologie, Université de Paris 6

(3) CNES, Centre Spatial de Toulouse

(4) TECHNOFAN, Blagnac



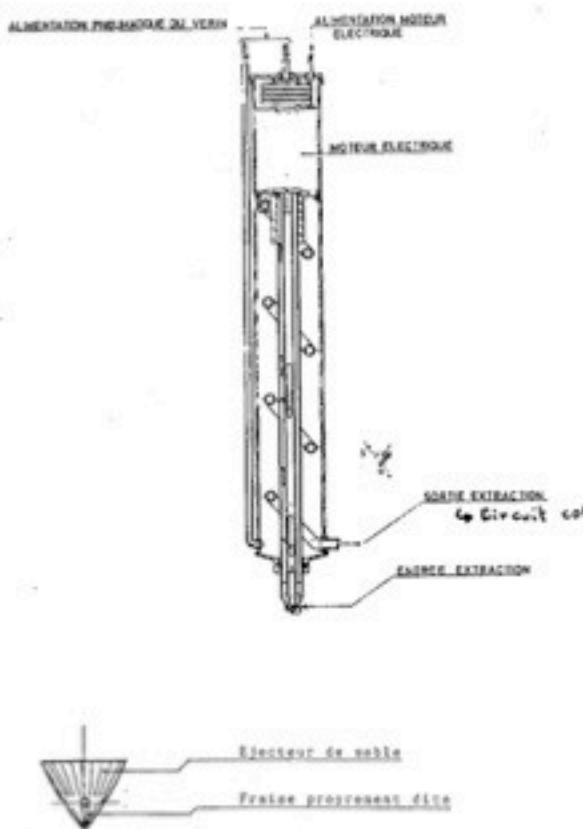
A.K.A. 'La Fraise de Mars'

Etude du sol de Mars

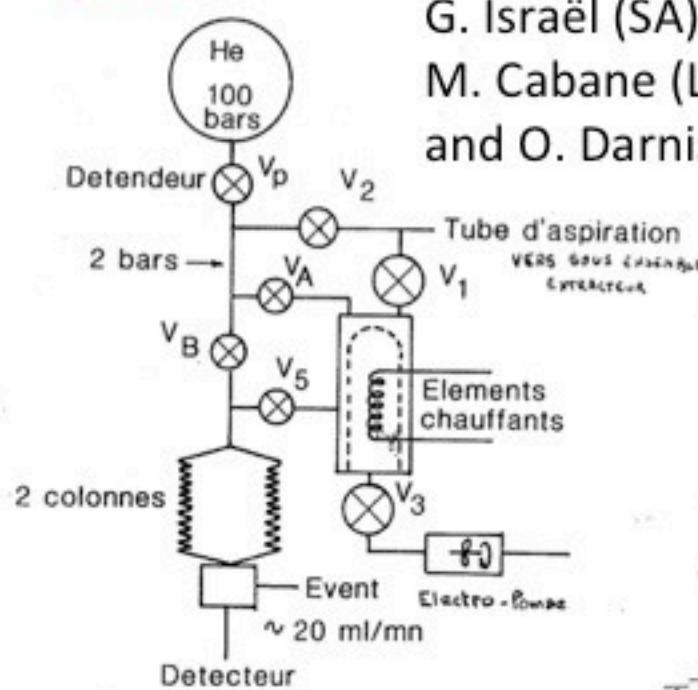
Colloque international 'Premiers résultats de la mission PHOBOS
et futures missions d'exploration de Mars

Paris, 1989.

Forage et prélevement

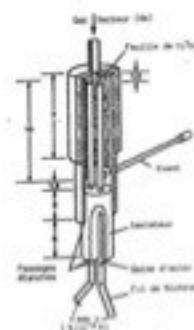


Pyro-GC



G. Israël (SA), F. Raulin (LISA),
M. Cabane (LM), E. Chassefière (SA),
and O. Darnis (Technofan) :

An instrument aboard a Martian Rover for sampling, thermal extraction and volatiles analysis of the soil.



ALH84001,0



**1996 : NASA
ALH84001 (ANSMET)**





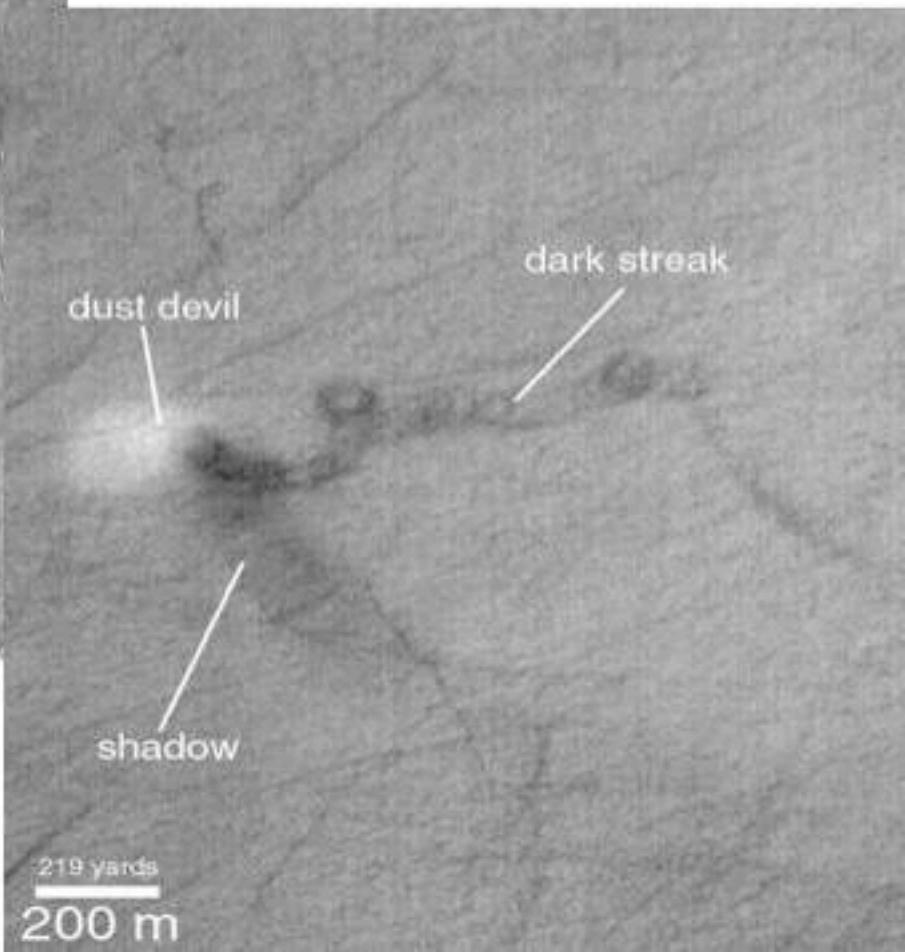
**1996 : NASA
SOJOURNER_PATHFINDER**





Gullies at Kaiser crater

1997 : NASA
MARS GLOBAL SURVEYOR



1997-1999 GSFC/NASA (**P Mahaffy**) : projet CHARGE / Champollion
(collab avec SA, LISA)
Pyro-GC-MS sur la comète Tempel1

L'exploration cométaire se poursuivra
dans le cadre ESA de COSAC / Rosetta

NAISSANCE DU PROJET SAM (Sample Analysis on Mars)

Colloque CNES ‘Mars’ – Novembre 1998 :

MARS EXPLORATION PROGRAM AND SAMPLE RETURN MISSIONS

IN SITU INORGANIC AND ORGANIC ANALYSIS (Py-GC-MS) OF THE MARTIAN SOIL,
ON MARS 2005 MISSION

M. Cabane, G. Israel, P. Coll, P. Rannou

Service d'Aéronomie du CNRS, Université Pierre et Marie Curie

F. Raulin, R. Sternberg

Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques, Université Paris XII,

A. Jambon

Laboratoire de Pétrologie, Université Pierre et Marie Curie

E. Chassefière

Laboratoire de Météorologie Dynamique, Université Pierre et Marie Curie

J.-J. Berthelier

Centre d'Etudes des Environnements Terrestre et Planétaires, CNRS.

NAISSANCE DU PROJET SAM (Sample Analysis on Mars)

Colloque CNES ‘Mars’ – Novembre 1998 :

MARS EXPLORATION PROGRAM AND SAMPLE RETURN MISSIONS

IN SITU INORGANIC AND ORGANIC ANALYSIS (Py-GC-MS) OF THE MARTIAN SOIL,
ON MARS 2005 MISSION

Prélèvements d'atmosphère et de sol, suivis de pyrolyse et analyse GC-MS

- Recherche de composés organiques : sources, évolution.
- Minéralogie : traçage de l'eau liquide, évolution de l'atmosphère
- Etats d'oxydation, isotopes : évolution de Mars, habitabilité

SAM pour Mars

1998-2001

Etudes de faisabilité (crédits CNES)

Tests en laboratoire

Etc etc

- * **Patrice Coll** (thèse au LISA/Titan) ⇒ SAM (Post-Doc CNES -au SA) ... Prof ParisVII
- * **David Coscia** (Ingé. CNRS, LISA, ex-ACP) ⇒ SAM (IR au SA) ... IR LATMOS
- * **Cyril Szopa** (thésitif au LISA) ⇒ SAM (puis .. Post-doc CNES -au SA) ... Prof UVSQ

Présentations aux groupes de travail Système Solaire CNES

M. Cabane – P. Coll : le Projet SAM

1999, 2000, 2001

R&T CNES :

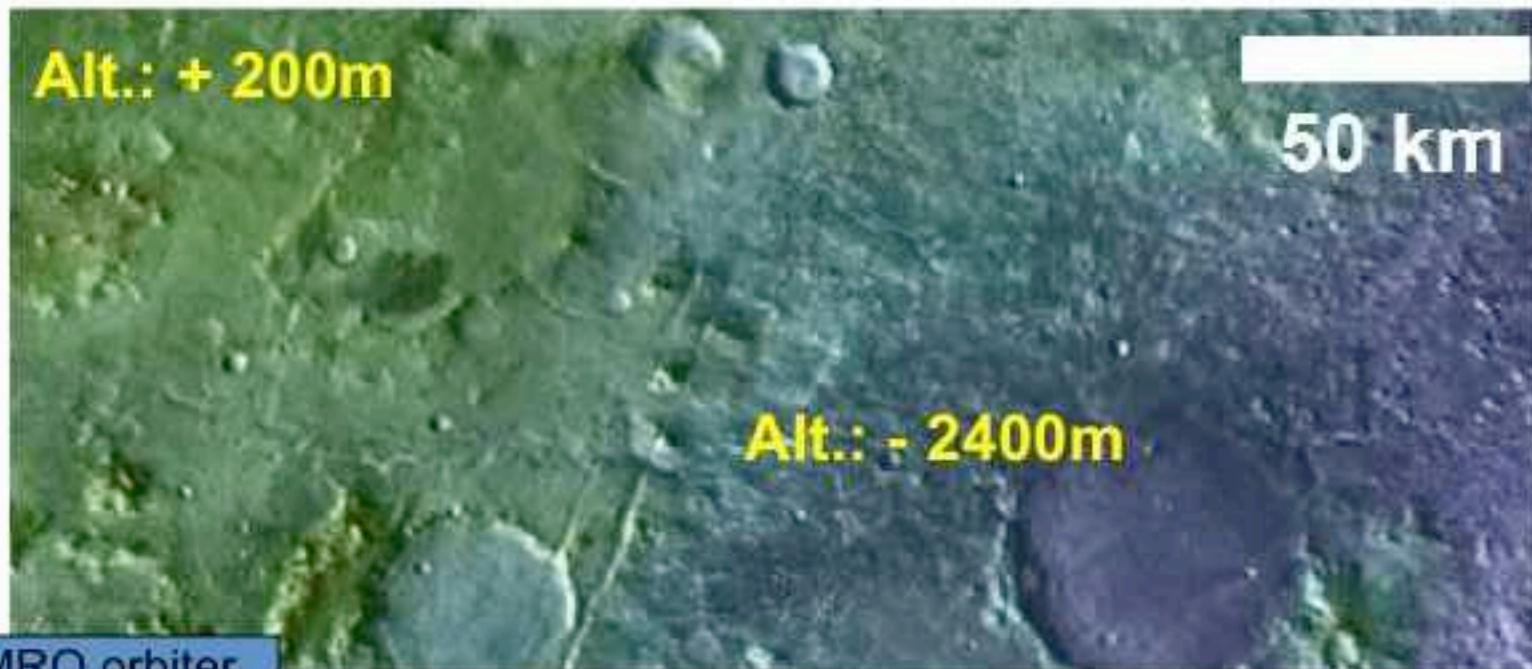
Dérivatisation, DéTECTEURS chromato, Fours pyrolyse

CDDs CNES

Jezero crater (18,2 N ; 77,6E)

epoch : Noachian (Phyllosian)

- 3,5 Ga



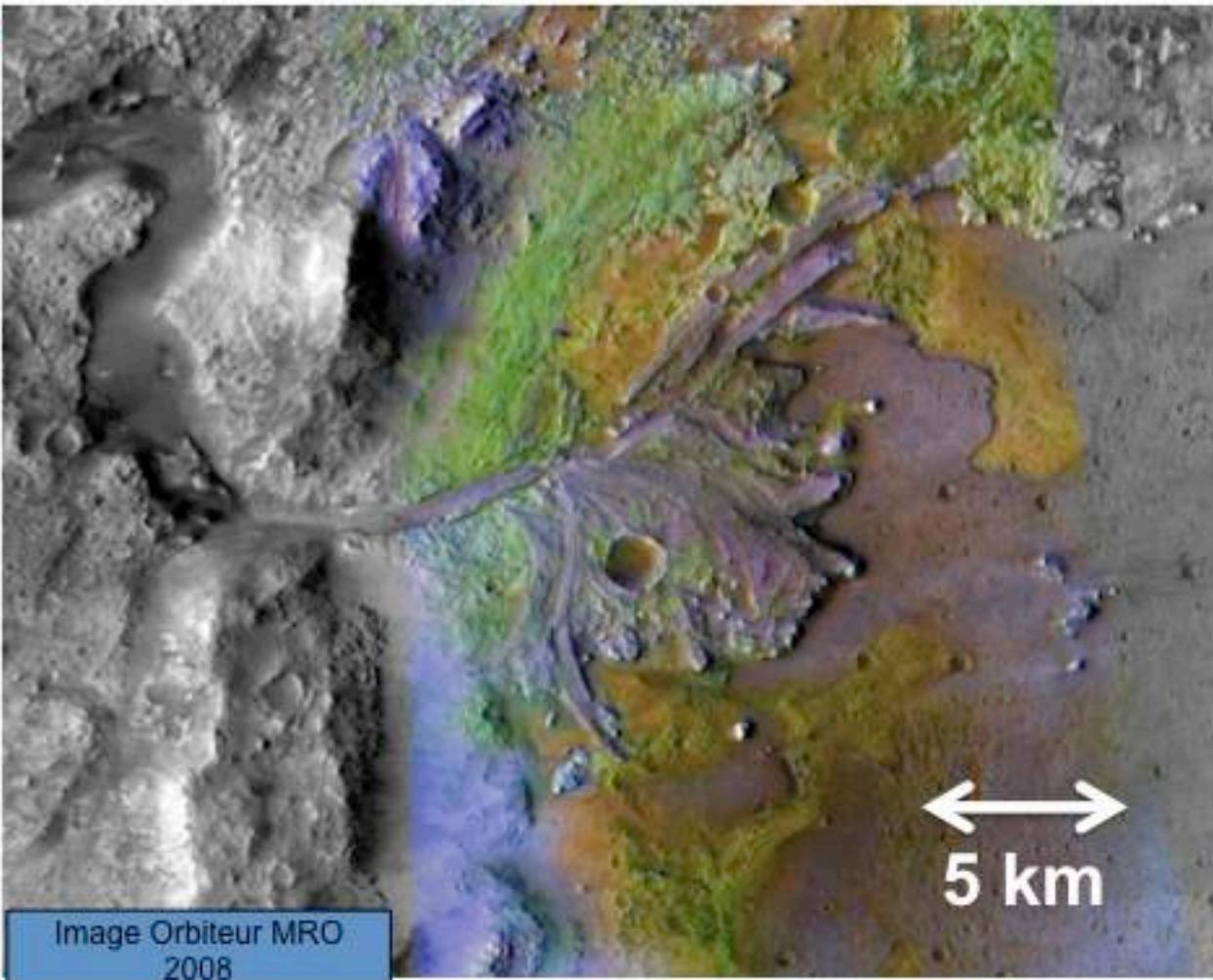
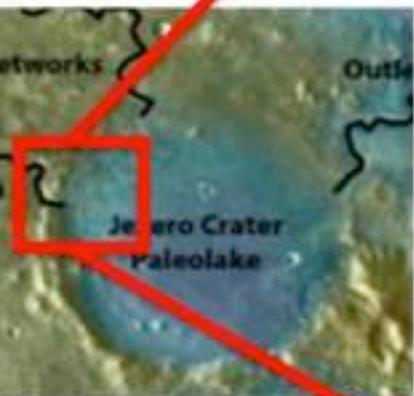
Jezero crater (18,2 N ; 77,6E)
epoch : Noachian - 3,5 Ga



Image MRO orbiter
2008

False colors

Jezero crater



green = clays - orange = olivine - violet = sands

B. Ehlmann Nature Geosciences 2008 - C. Fassett, mars2web MSL Landing Site 2nd workshop - S.C. Olsen PSS 2012

SAM pour Mars

1988-1997 Développement d'ACP-GC-MS , collab SA-LISA-GSFC/NASA

1997-1999 GSFC/NASA : projet CHARGE / Champollion
(collab avec SA, LISA)

2001 Pyro-GC-MS sur la comète Tempel1

réunions CNES, GSFC/NASA (**P. Mahaffy**, H. Niemann) , SA, LISA
SAM : Leadership US

Sample Analysis at Mars

* **Arnaud Buch** (thèse à LISA) ⇒ SAM (puis post-doc NASA au GSFC)

Actuel^t : MC LGPM/ECP

SAM pour Mars

1988-1997 Développement d'ACP-GC-MS , collab SA-LISA-GSFC/NASA

1997-1999 GSFC/NASA : projet CHARGE / Champollion
(collab avec SA, LISA)

2001 Pyro-GC-MS sur la comète Tempel1

réunions CNES, GSFC/NASA (**P. Mahaffy**, H. Niemann) , SA, LISA
SAM : Leadership US

Sample Analysis at Mars

* **Arnaud Buch** (thèse à LISA) ⇒ SAM (puis post-doc NASA au GSFC)

Actuel^t : MC LGPM/ECP

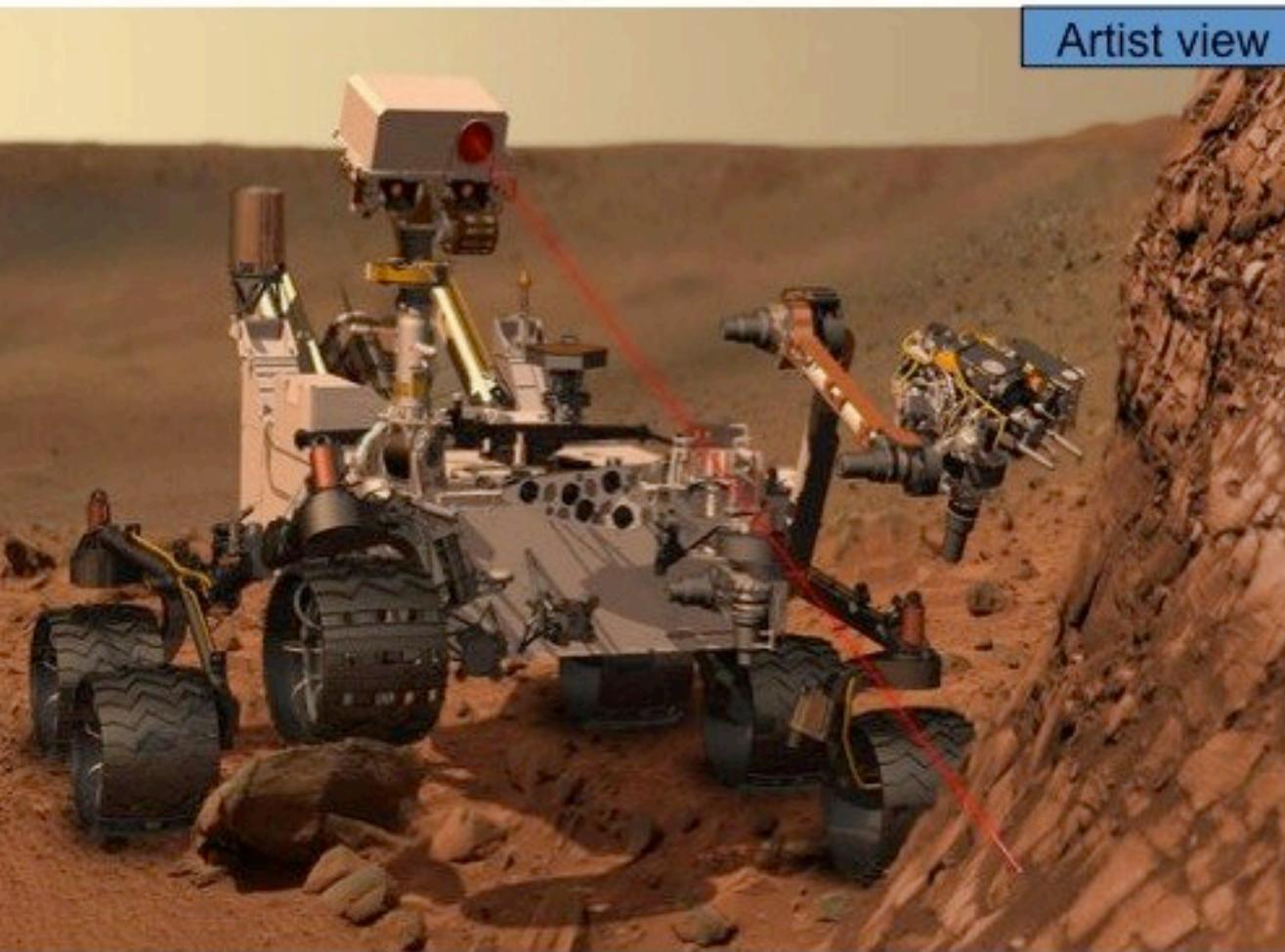
2003

SAM prévu pour l'AO NASA 'MSL 2009'

* **Fabien Stalport** (thèse à LISA) ⇒ SAM (puis ... post-doc NASA au GSFC)

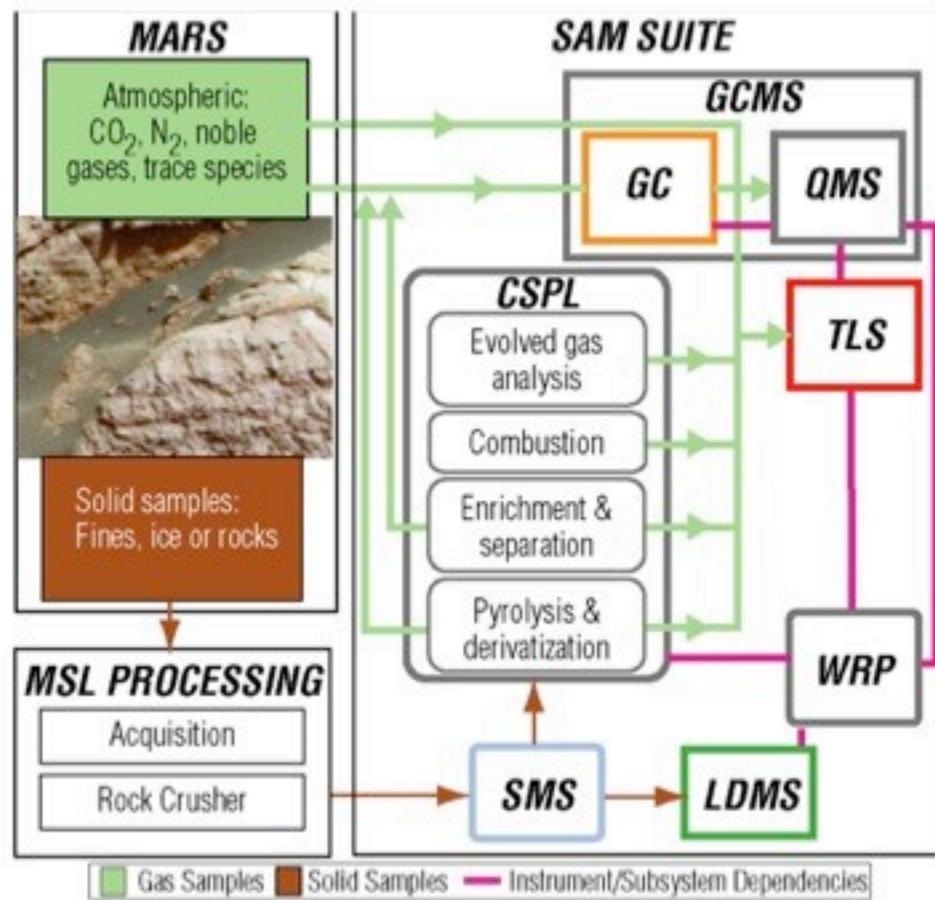
Actuel^t : MC LISA/UPEC

SAM pour Mars



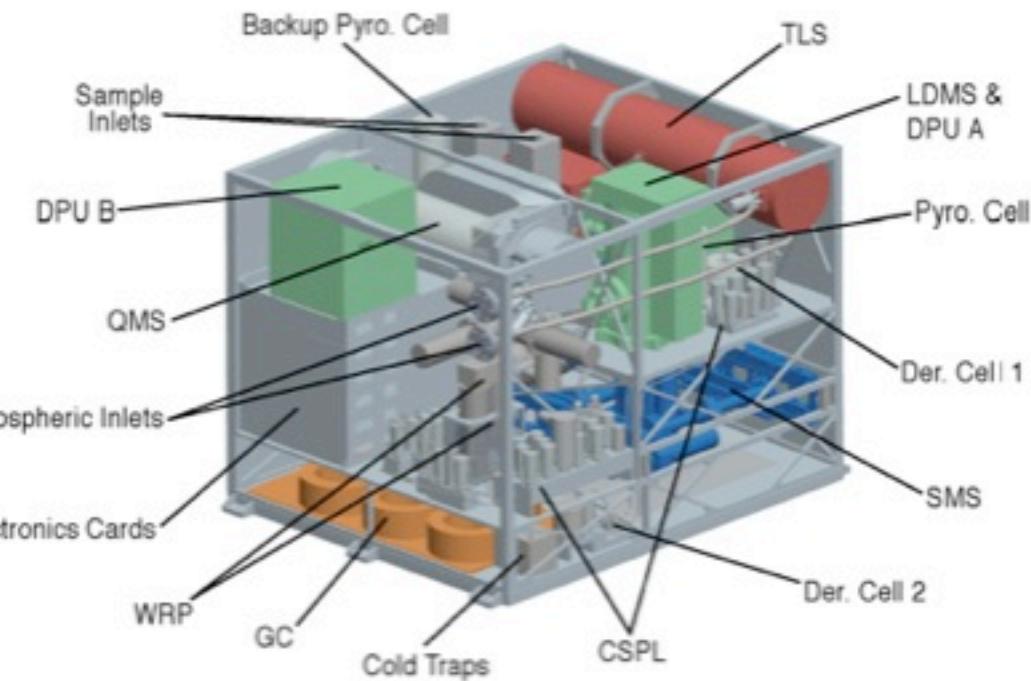
Curiosity : 900 kg
Science Payload : 80 kg
SAM : 40 kg

SAM pour Mars



CSPL + Chemical Separation and Processing Laboratory
SMS = Sample Manipulation System, WRP = Wide Range Pump
MS = Mass Spectrometer, GC Gas Chromatograph
TLS = Tunable Laser Spectrometer,
LDMS = Laser Desorption Mass Spectrometer w/ imager IM

SAM pour Mars



| Co-Investigator | Institution | Co-Investigator | Institution | Co-Investigator | Institution |
|-------------------|-------------------|-------------------------------------|------------------|------------------|--------------------|
| Paul Mahaffy, PI | NASA GSFC | Wes Huntress | Carnegie Inst. | Navarro-Gonzalez | U. Mexico |
| Sushil Atreya | U. Michigan | Bruce Jakosky | U. Colorado | Toby Owen | U. Hawaii |
| Will Brinckerhoff | JHU/APL | John Jones | NASA JSC | Bob Pepin | U. Minnesota |
| Michel Cabane | U. Paris | Laurie Leshin | Arizona State U. | Francois Raulin | U. Paris |
| Patrice Coll | U. Paris | Chris McKay | NASA Ames | Francois Robert | Natl. History Mus. |
| Pamela Conrad | JPL | Doug Ming | NASA JSC | James Scott | Carnegie Inst. |
| Steve Gorevan | Honeybee Robotics | Richard Morris | NASA JSC | Steve Squyres | Cornell U. |
| John Grotzinger | MIT | Shaded cell = SAM hardware provider | | | Chris Webster |
| | | | | | JPL |

SAM pour Mars

1988-1997 Développement d'ACP-GC-MS , collab SA-LISA-GSFC/NASA

1997-1999 GSFC/NASA : projet CHARGE / Champollion
(collab avec SA, LISA)

2001 Pyro-GC-MS sur la comète Tempel1

réunions CNES, GSFC/NASA, SA, LISA

SAM : Leadership US

Sample Analysis at Mars

* Arnaud Buch (thèse à LISA) ⇒ SAM (puis post-doc NASA au GSFC)

Actuel : MC LGPM/ECP

2003

SAM prévu pour l'AO NASA 'MSL 2009'

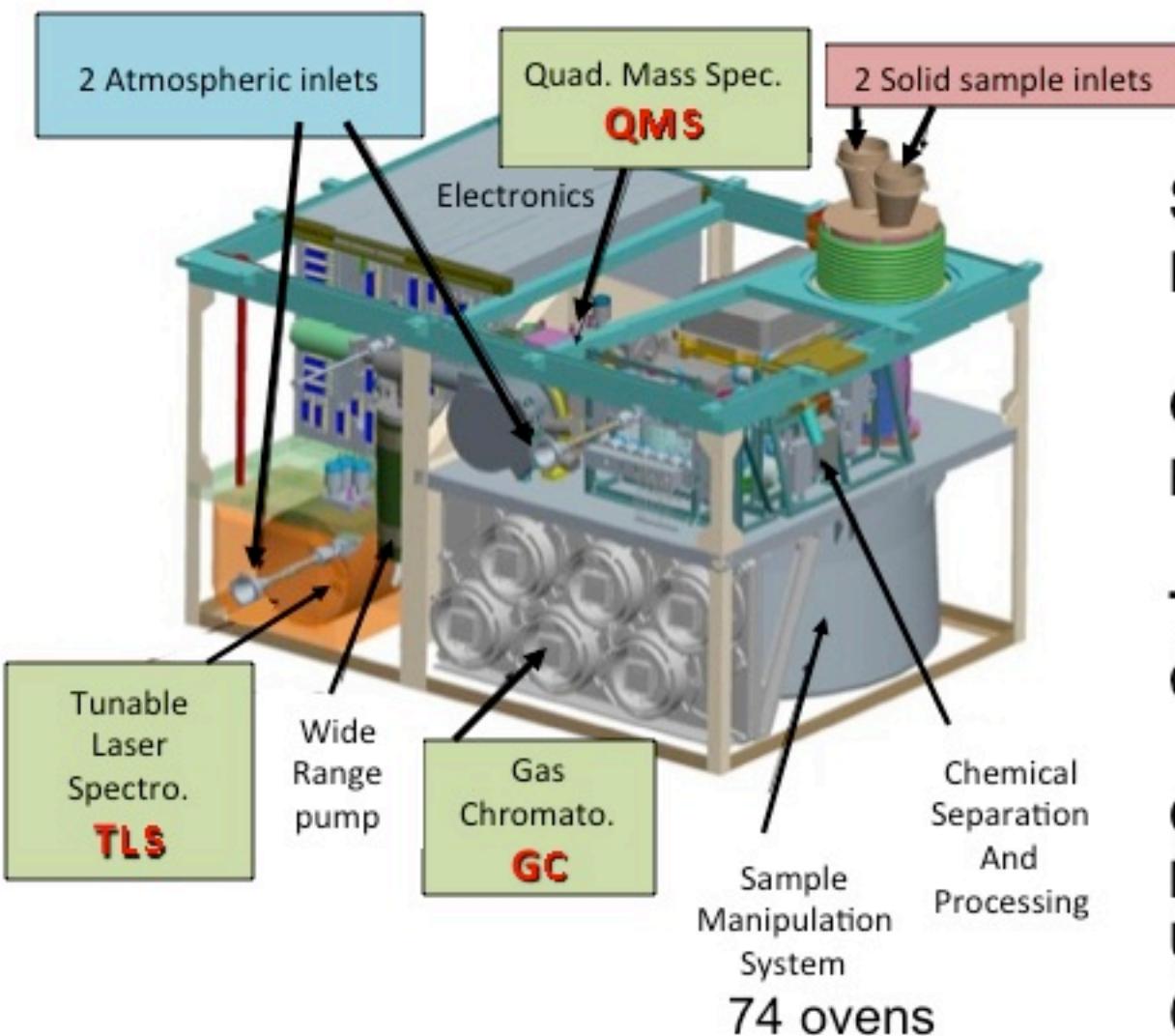
* Fabien Stalport (thèse à LISA) ⇒ SAM (puis ... post-doc NASA au GSFC)

Actuel : MC LISA/UPEC

2005

SAM est sélectionné / projet 'MSL 2009'
(hormis LDMS)

SAM pour Mars



SAM PI :
P. Mahaffy GSFC NASA

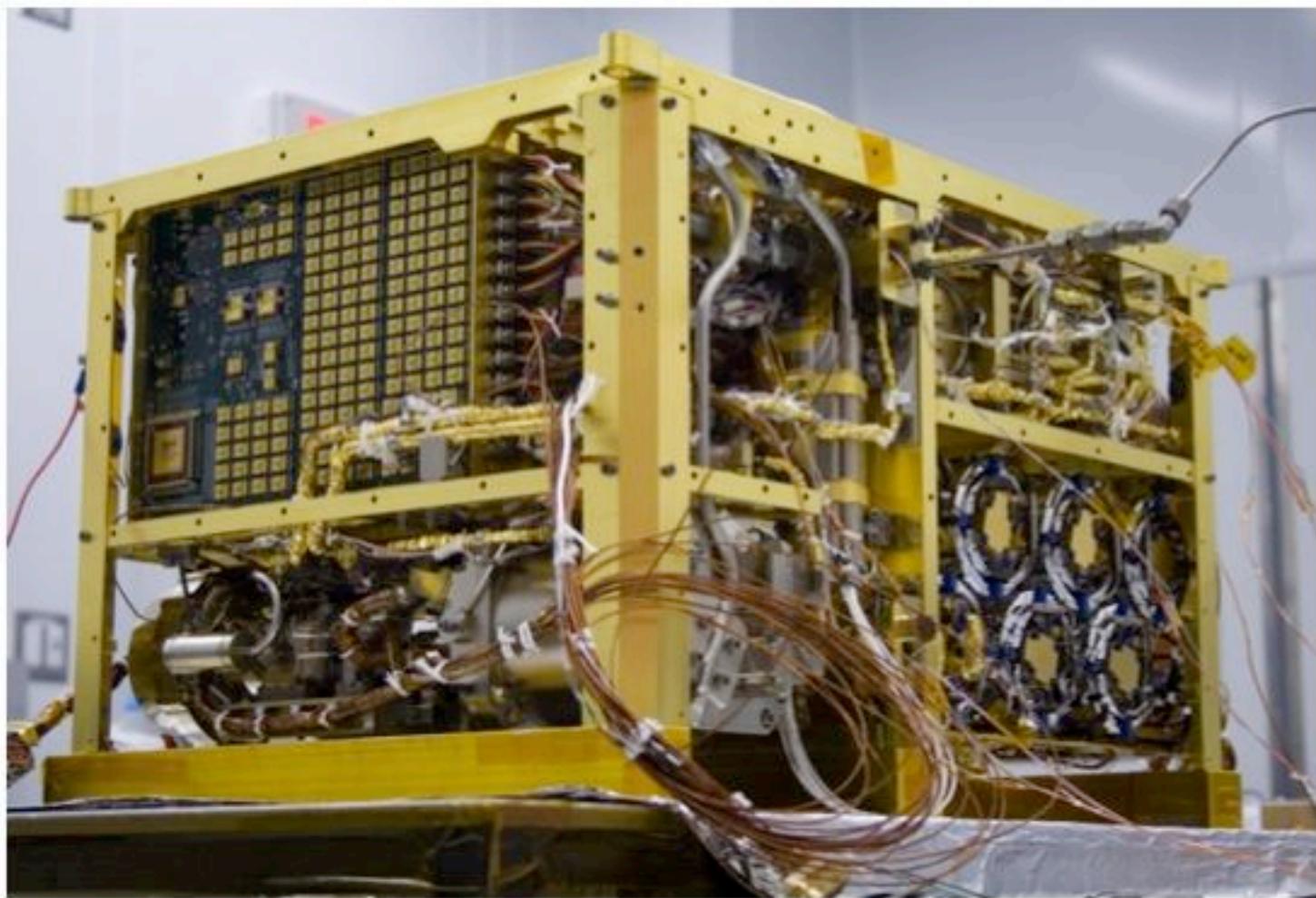
QMS :
P. Mahaffy GSFC NASA

TLS :
C. Webster JPL NASA

GC :
M. Cabane LATMOS
Univ Paris6 (UPMC)
(LATMOS, LISA ; CNES)

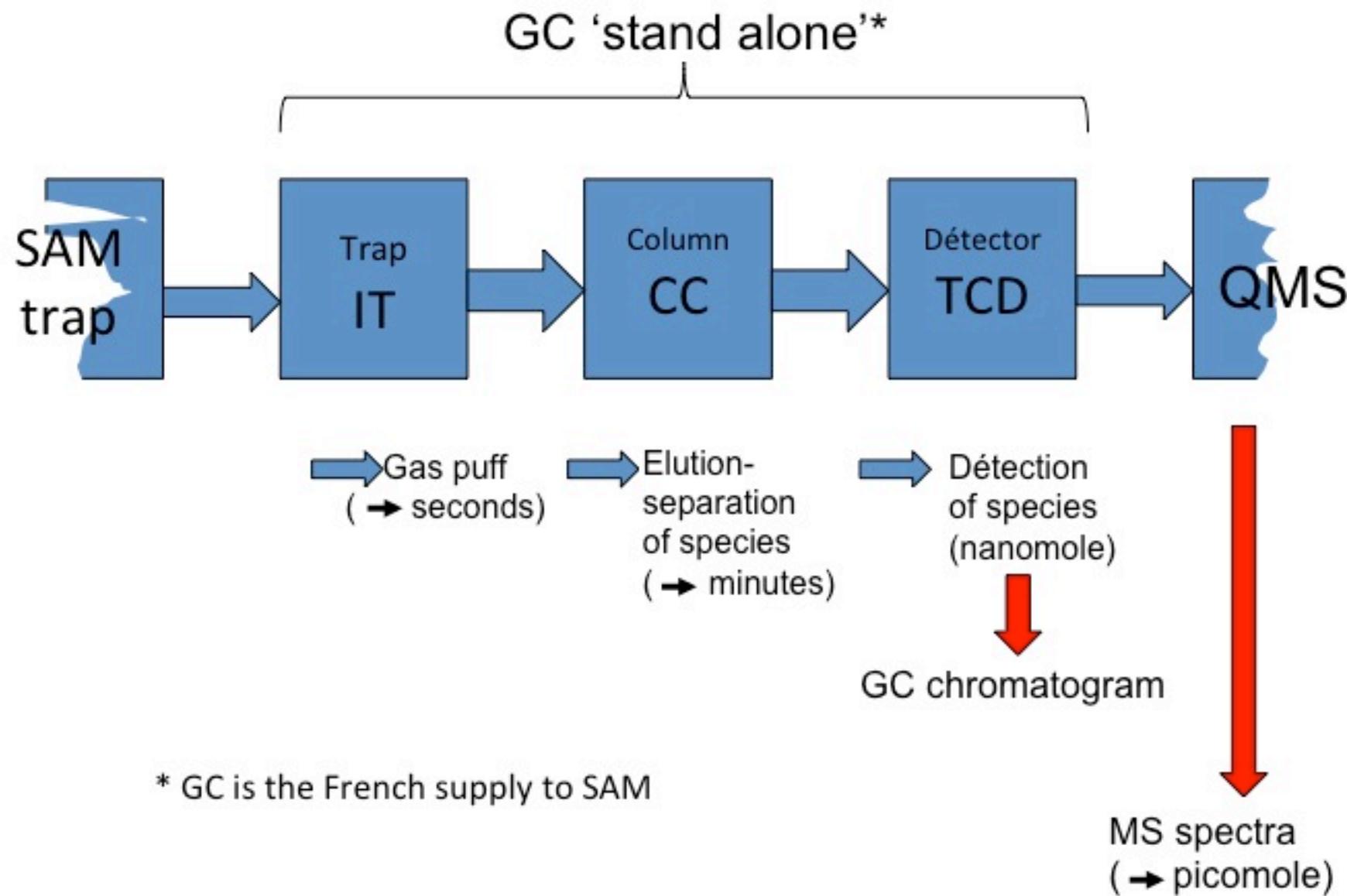
F. Rocard
A. Gaboriaud

SAM pour Mars



SAM ... quelques années plus tard

SAM pour Mars



* GC is the French supply to SAM

SAM pour Mars

Chromatographic Columns (collabs Varian, Restek for specific columns)

Length 30m, diameter 0.25mm, controlled T (isoth., ramp)

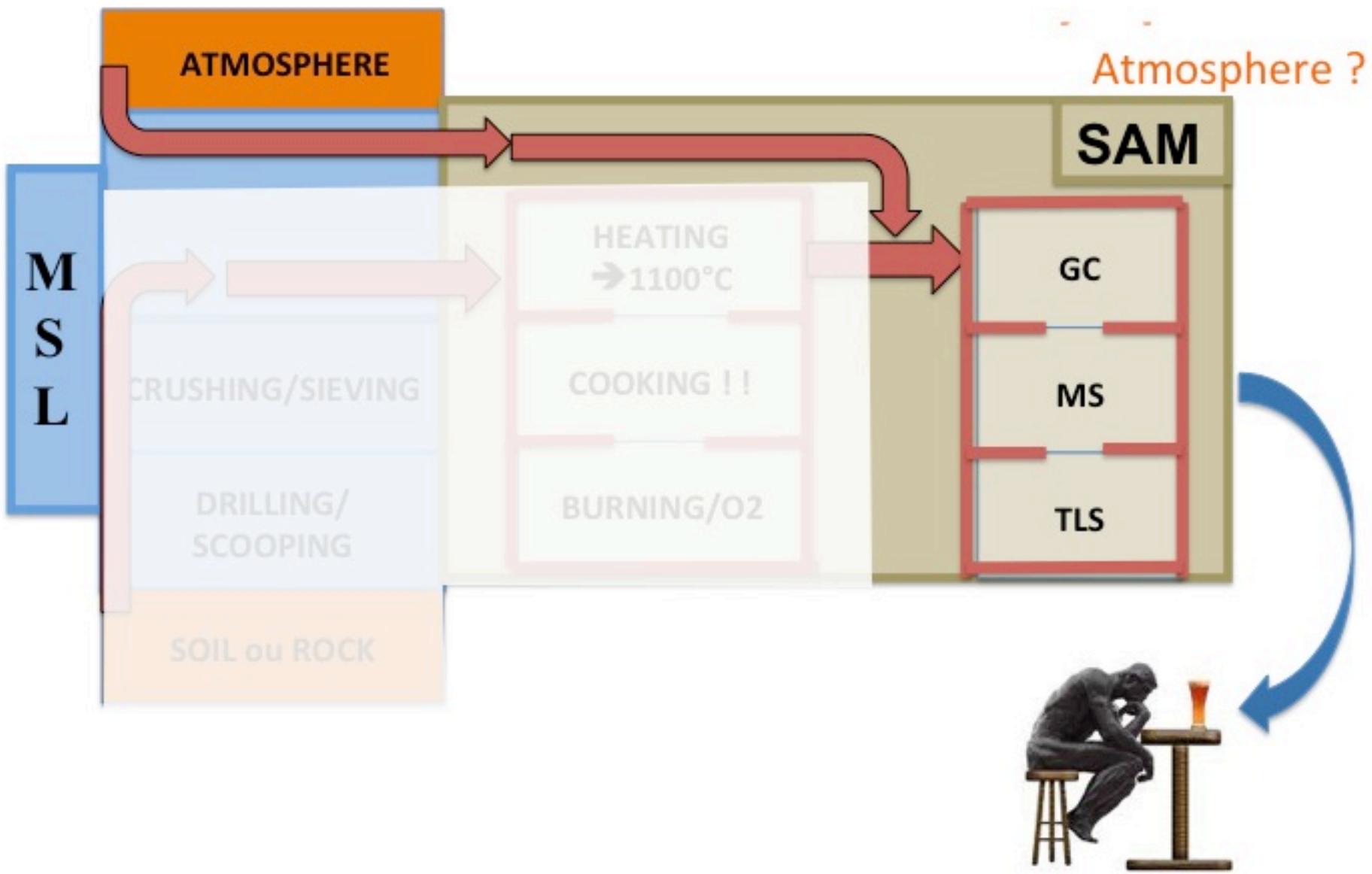
6 'GC' in parallel ('at the user's choice')

Equipped w/
[]

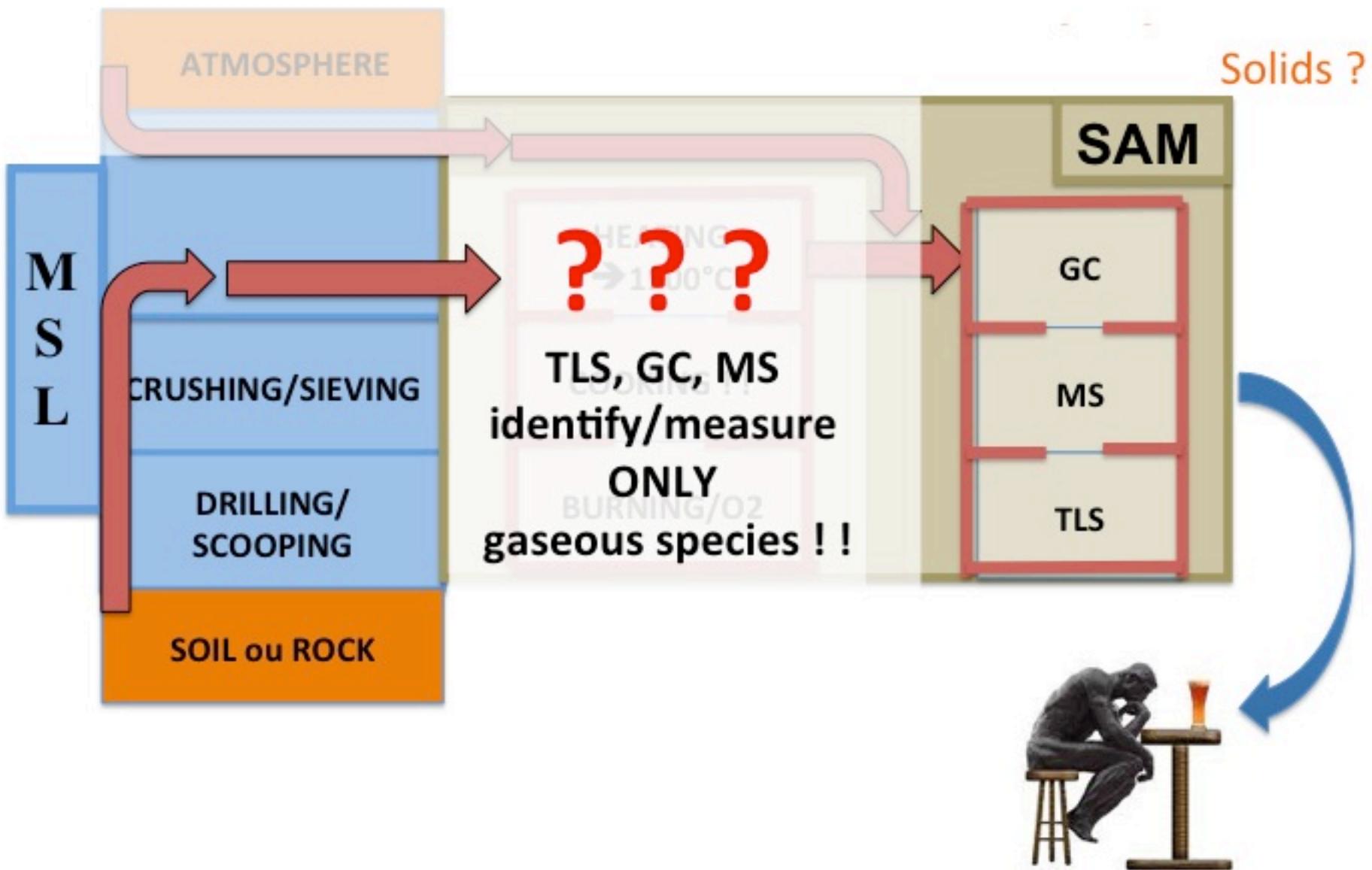
| Column | Stationary phase | Species targeted | IT | TCD |
|------------------------------|---|--|----|-----|
| GC1-MXT 20 WCOT | Polydimethylsiloxane with 20 % of phenyl | Medium molecular weight organics (C5–C15 organics) | N | N |
| GC2-MTX 5 (WCOT) | Polydimethylsiloxane with 5 % of phenyl | High molecular weight VOCs including >C15 chemical derivatives | N | Y |
| GC3-Carbobond (PLOT) | Carbon molecular sieve | Permanent gases and C1–C2 HCs | N | Y |
| GC4-Chirasil- β Dex CB | β cyclodextrin | Enantiomers of VOCs | Y | Y |
| GC5-MXT CLP (WCOT) | Polydimethylsiloxane with phenyl and cyanopropyle | Medium molecular weight organics (C5–C15 organics) | Y | Y |
| GC6-MXT Q (PLOT) | Divinylbenzene or substituted divinylbenzene | C1–C4 VOCs NH ₃ , S containing compounds | Y | Y |

PLOT = porous layer open tubes; WCOT = wall coated open tubular; VOC = volatile organic compounds

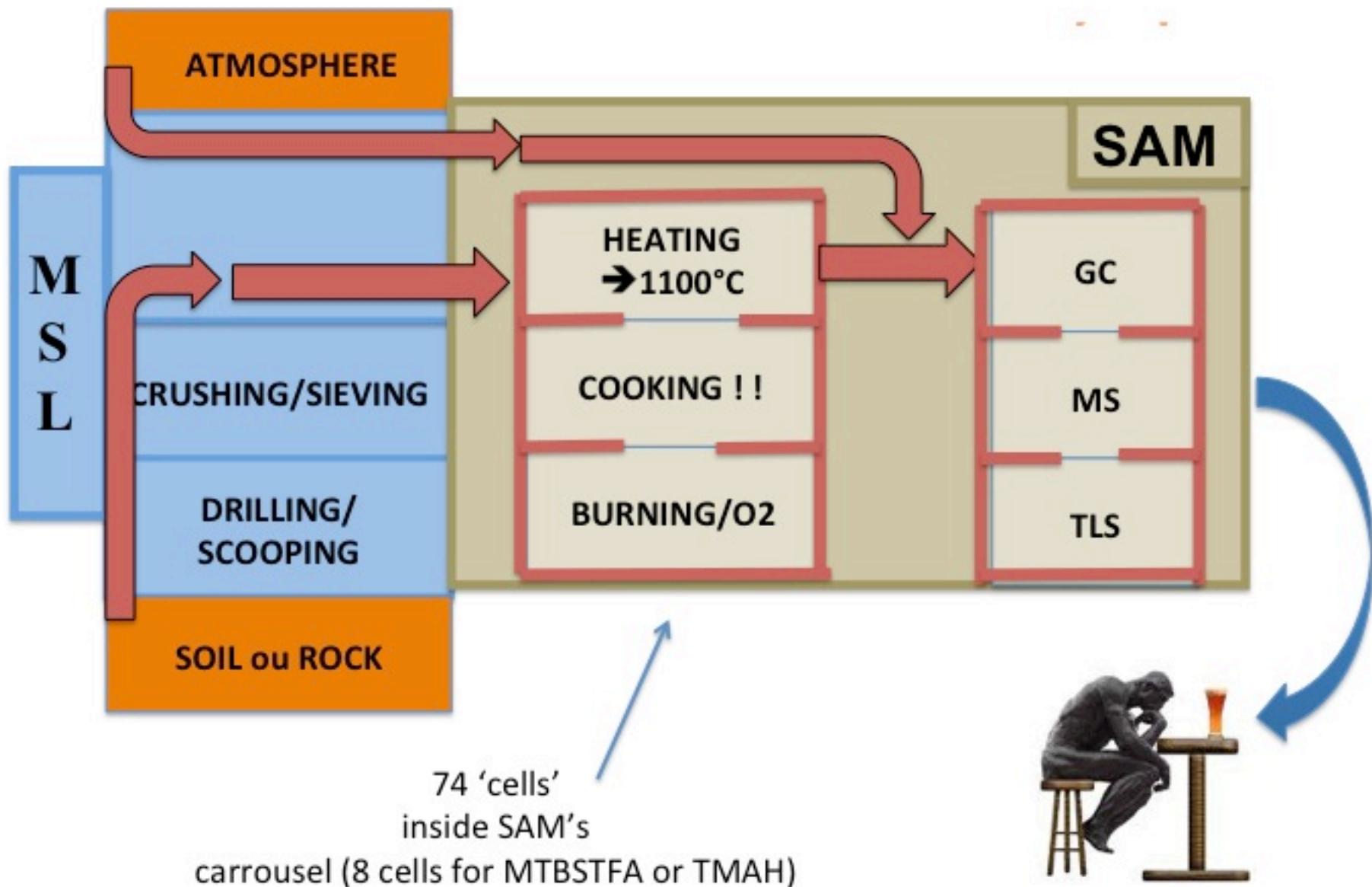
SAM pour Mars



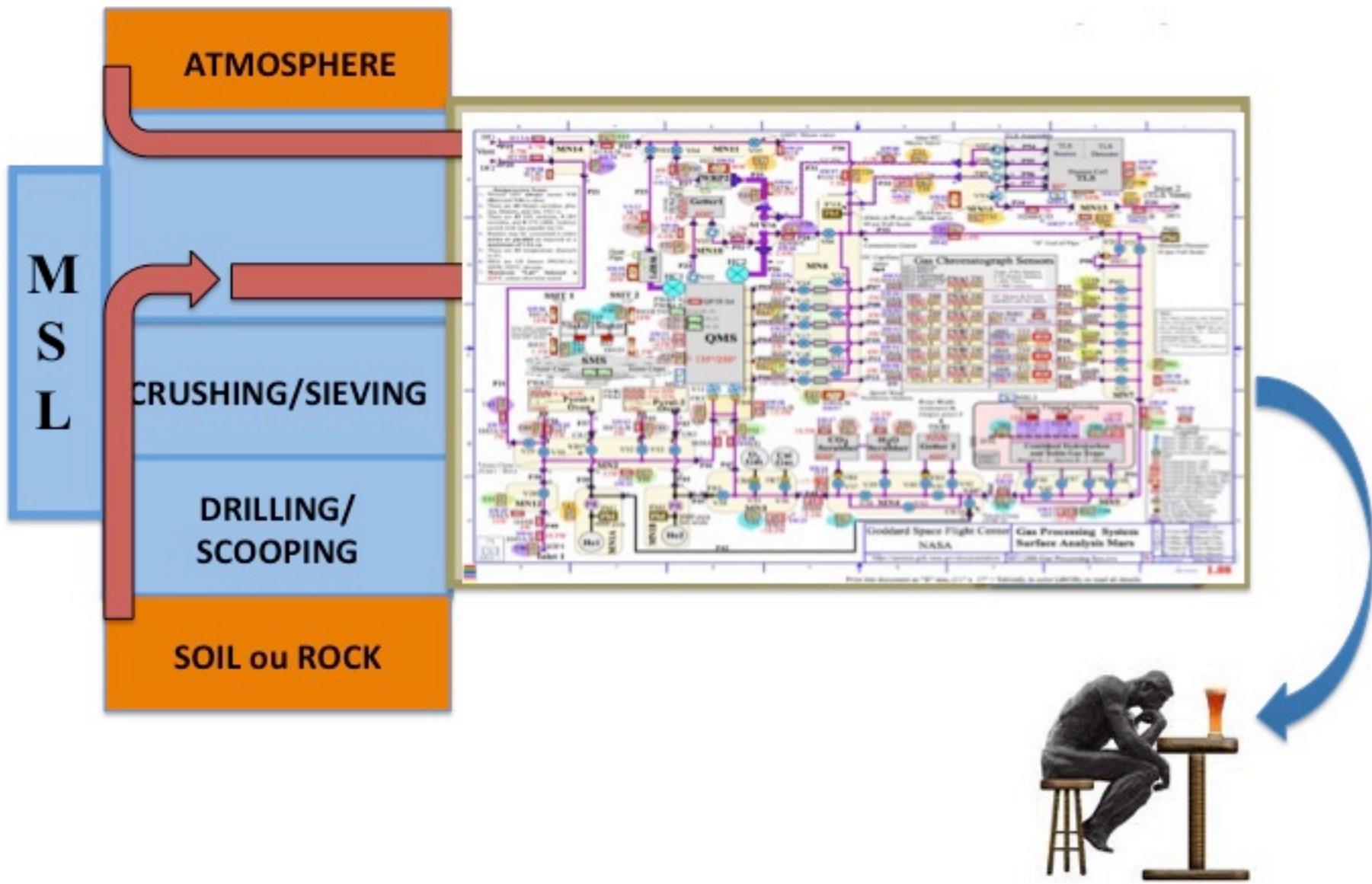
SAM pour Mars



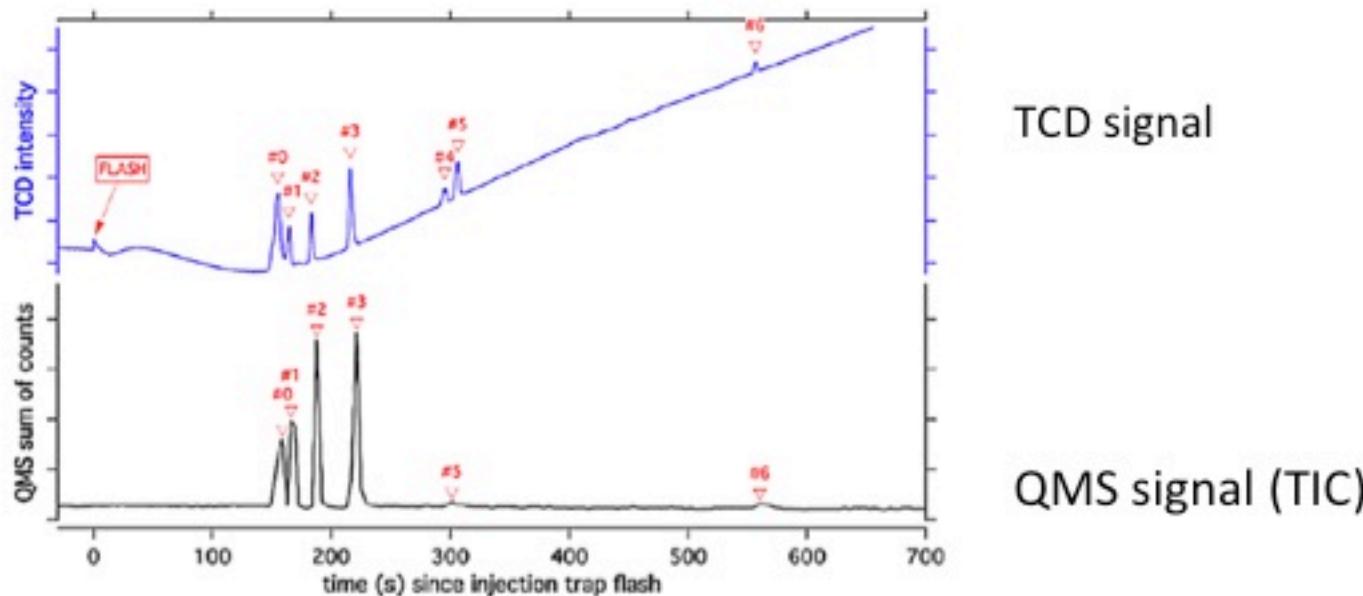
SAM pour Mars



SAM pour Mars



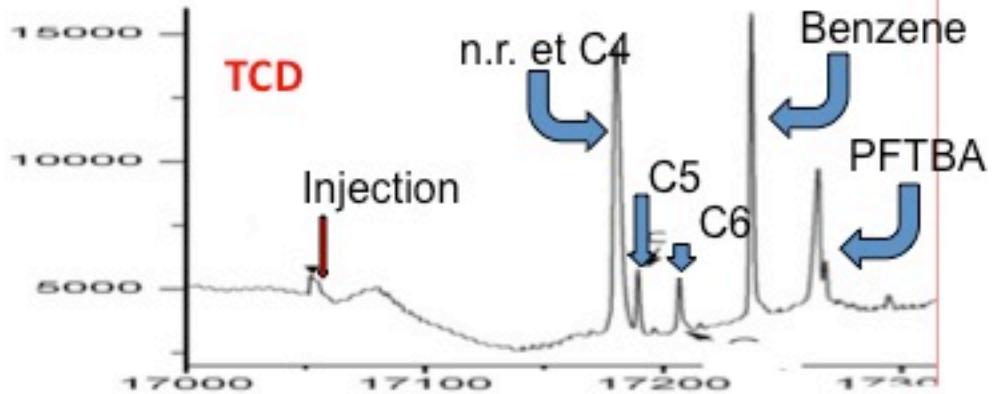
SAM pour Mars



(Mahaffy et al., 2012)

Calibration chromatogram
(on Earth!)

Conditions : $P_i = 1\text{ bar}$, $P_o \sim 0\text{ bar}$
 $T = 50^\circ\text{C}$, heat at $10^\circ\text{C}/\text{min}$ for 20 min, 250°C for 1 min
Compounds : 0. butane, 1. pentane, 2. hexane, 3. benzene, 4/5/6. background compounds



Tests on GC + MS
after integration in
SAM (flight model)

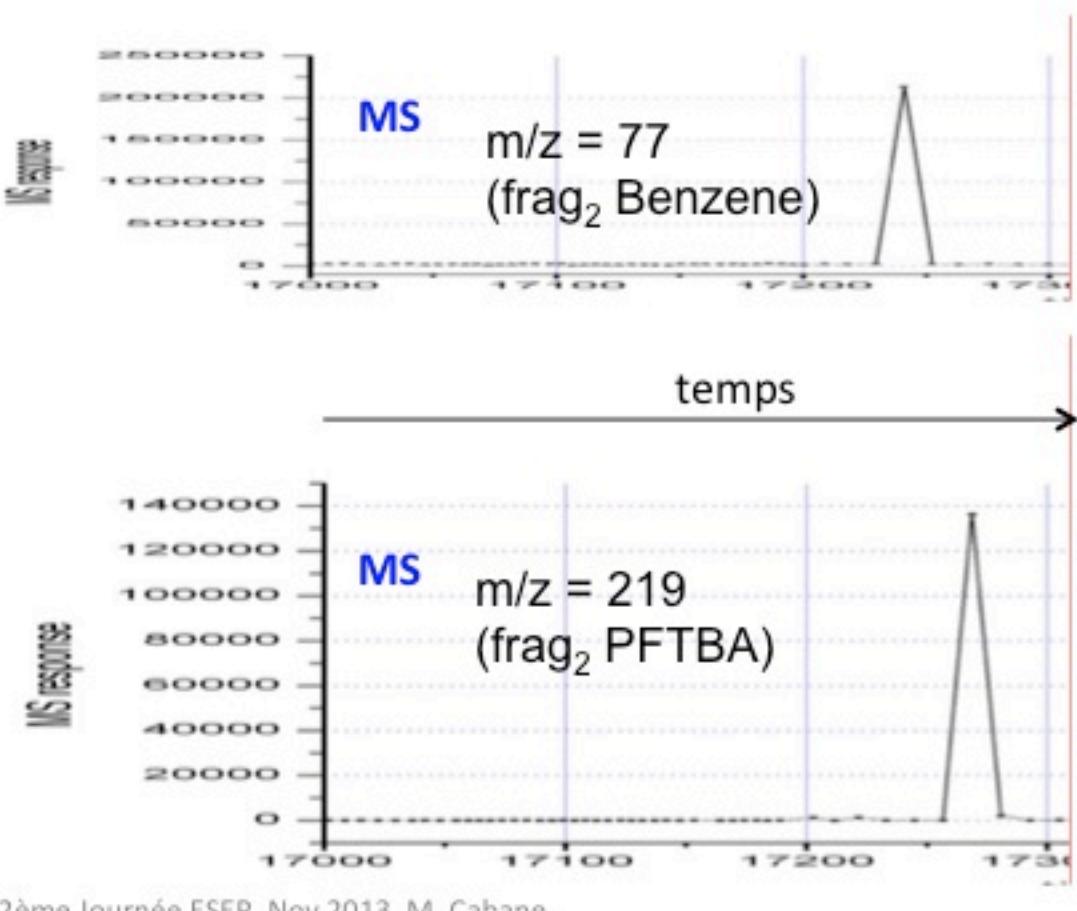
On Earth

TVAC2 CPT0 Mars 2010

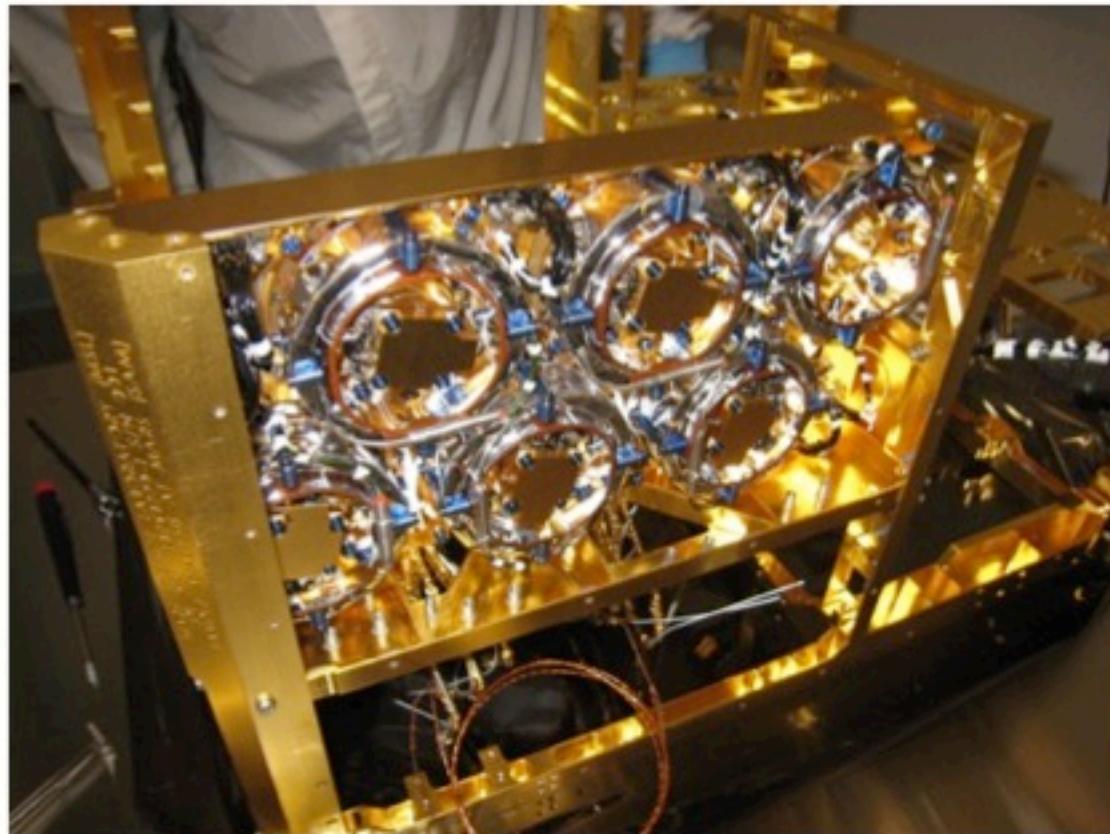
5 nanomols of HCmix
(Butane Pentane
Hexane Benzene)

+

5 nanomols ofe PFTBA
($C_{12}F_{27} N$)

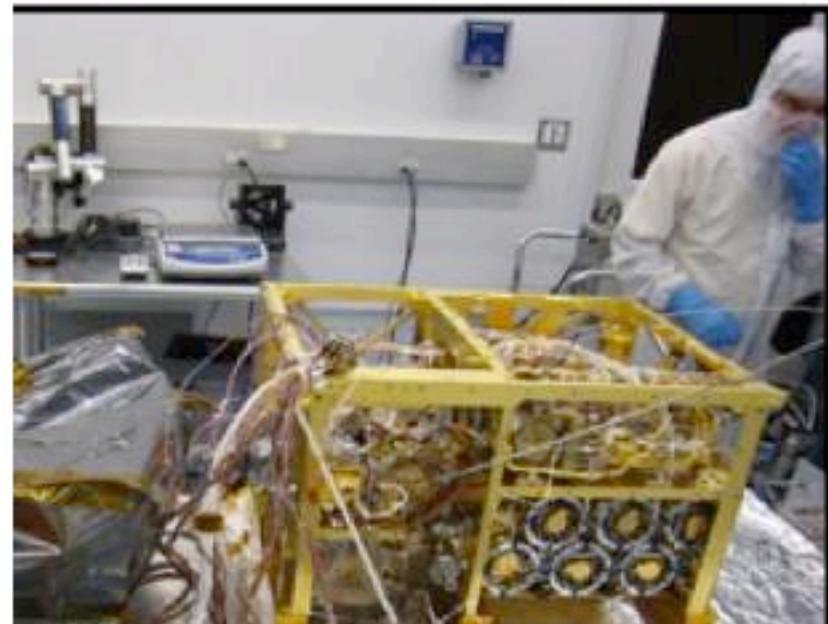


SAM pour Mars



SAM/GC Flight model as integrated into SAM

SAM pour Mars



Assembling SAM/GC
into SAM

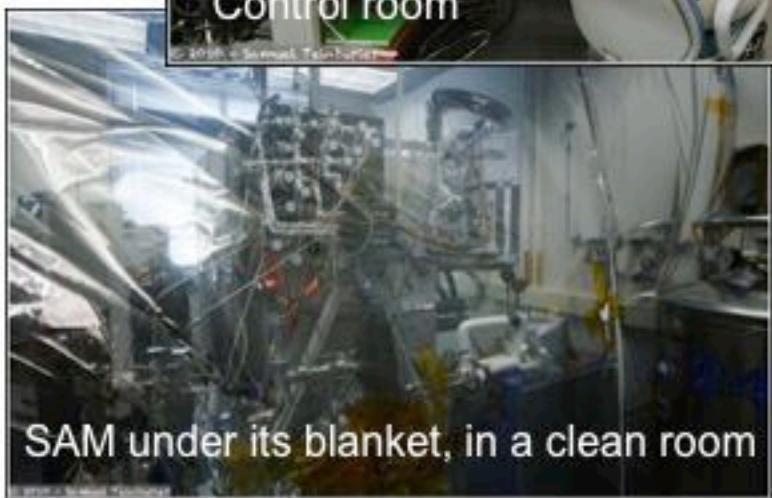


SAM pour Mars

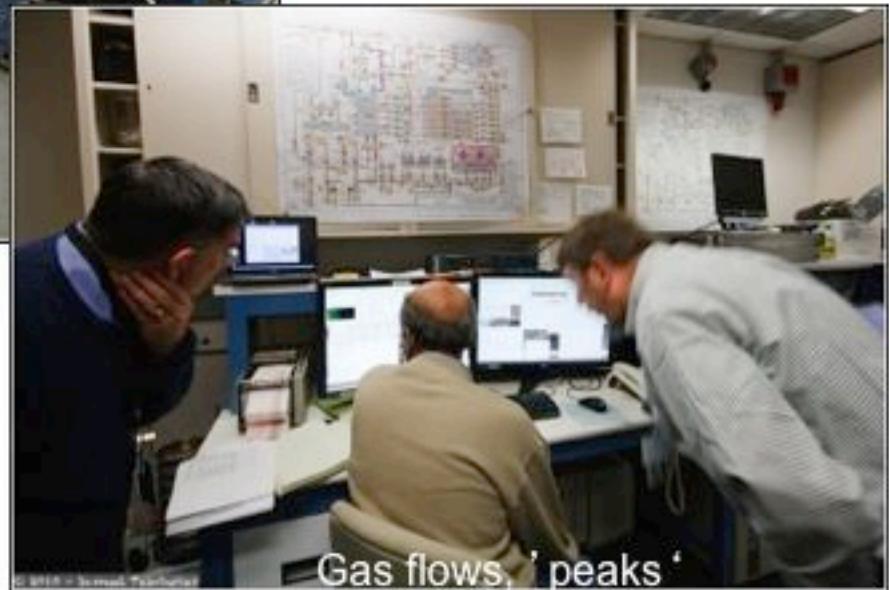


Fall 2010

Ultimate tests of
SAM ‘Flight
Model’

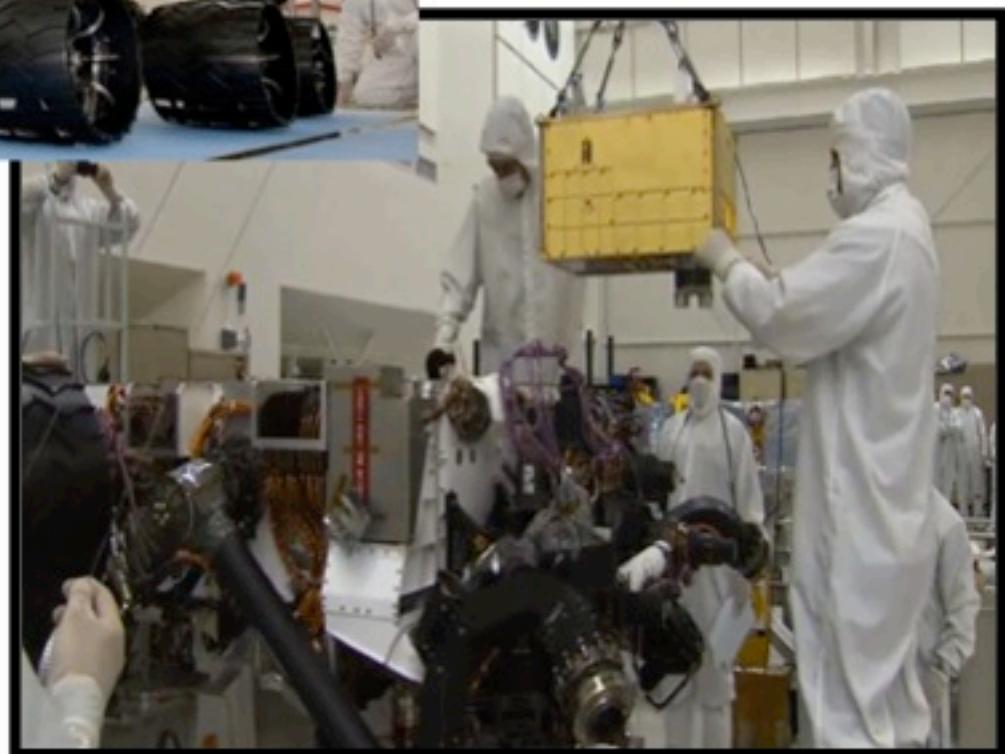


SAM under its blanket, in a clean room

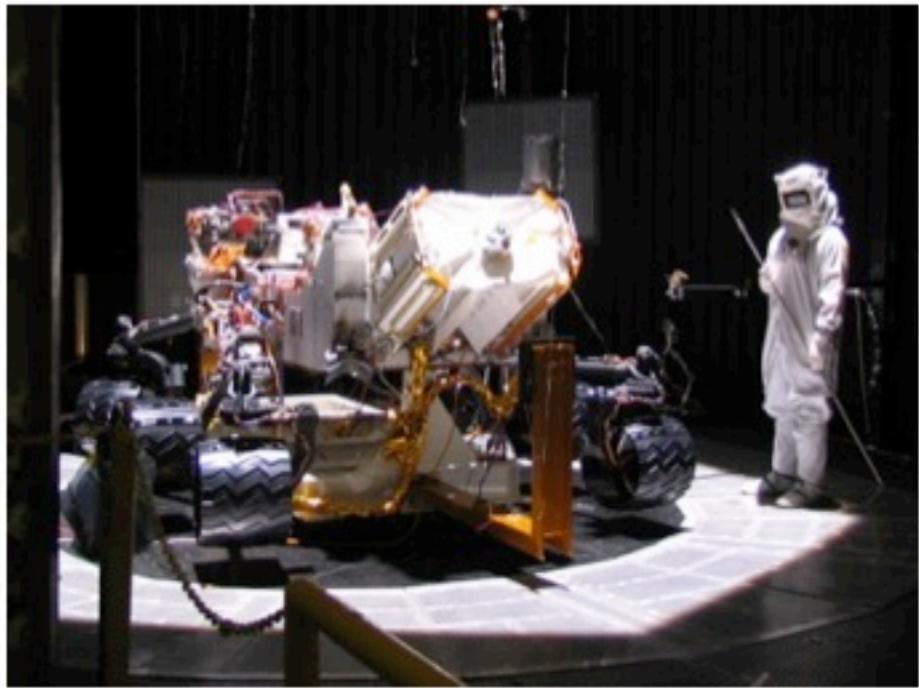


Gas flows, 'peaks'

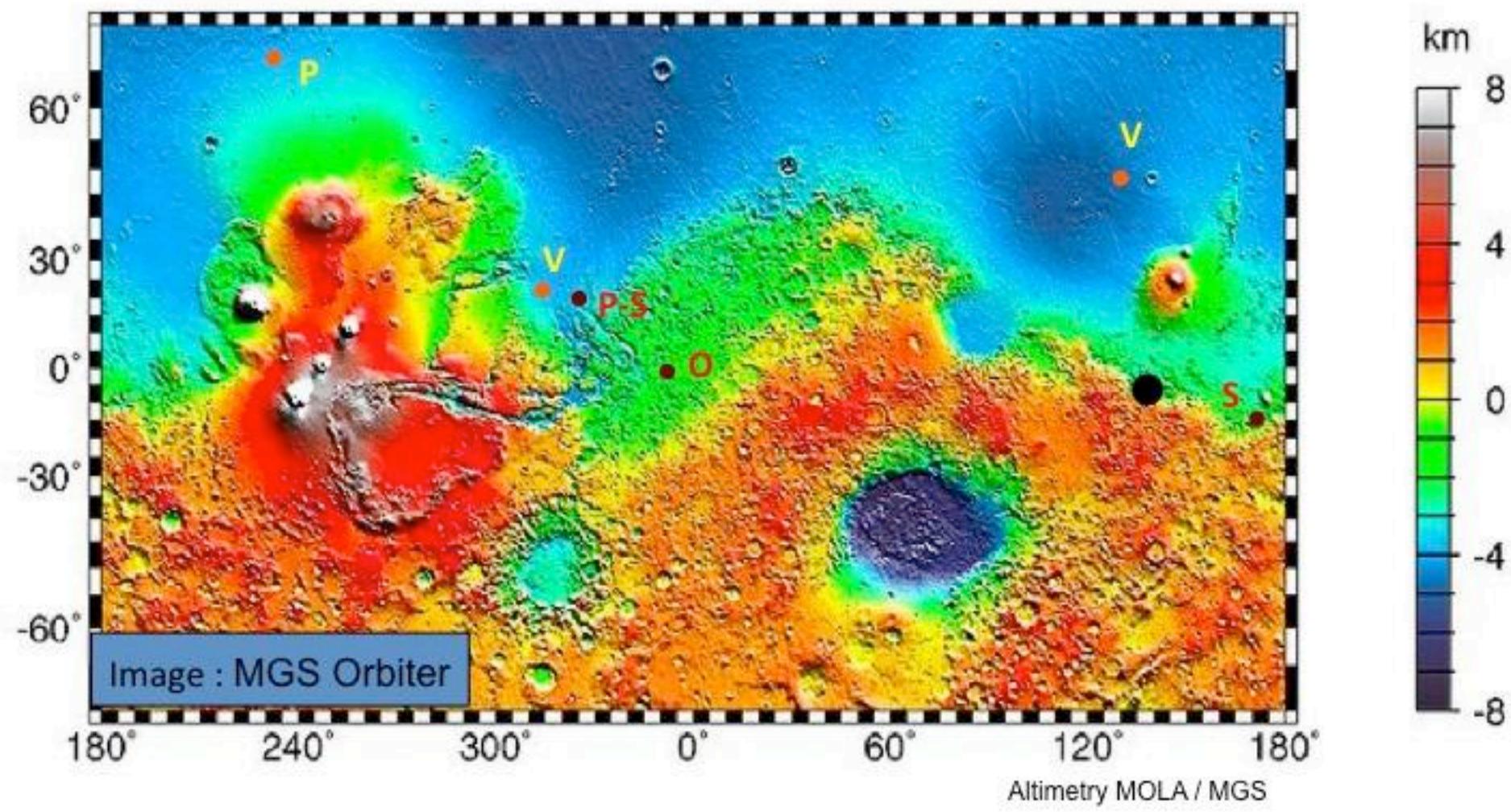
SAM pour Mars



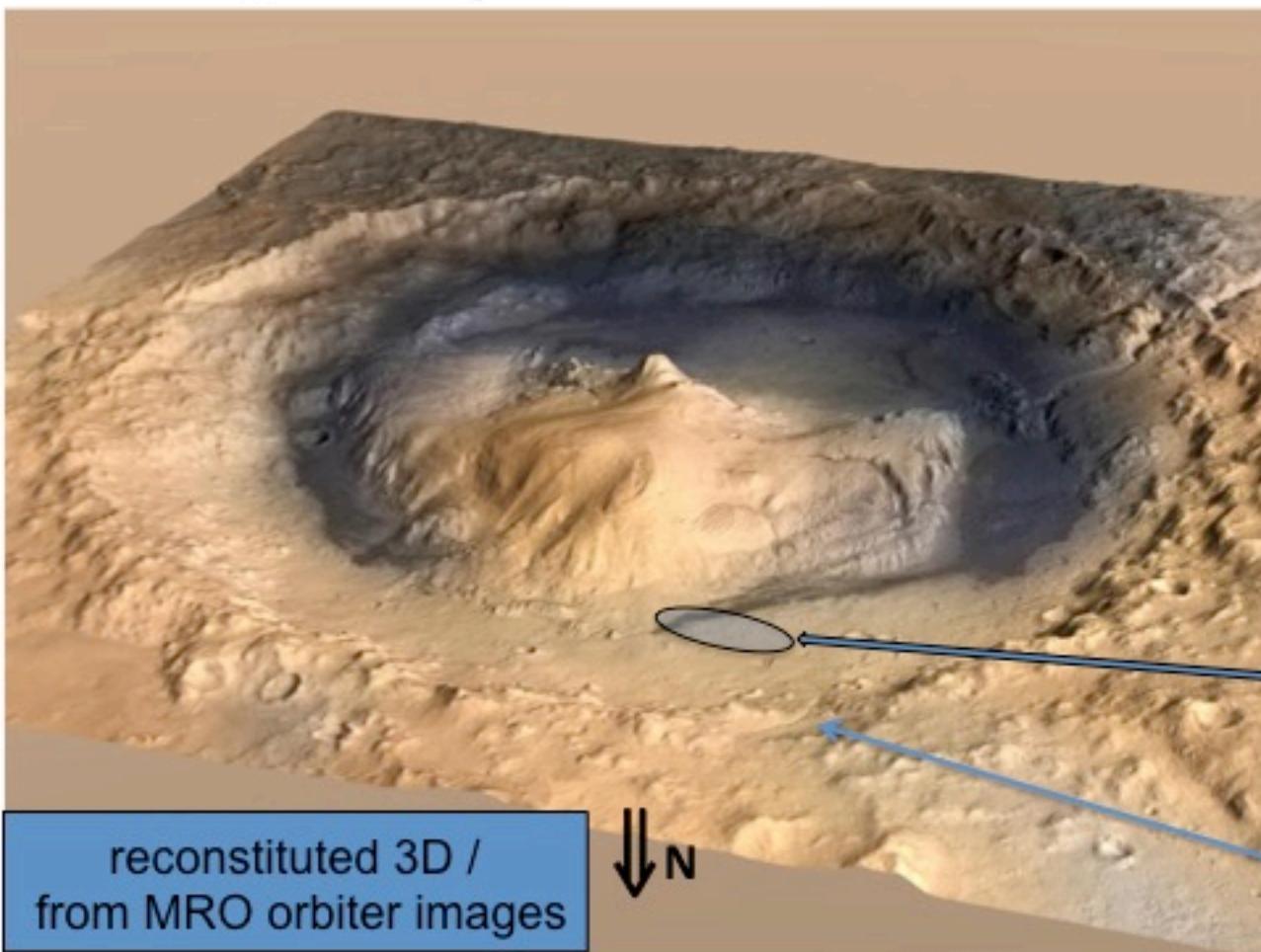
SAM pour Mars



SAM pour Mars



GALE, an impact crater

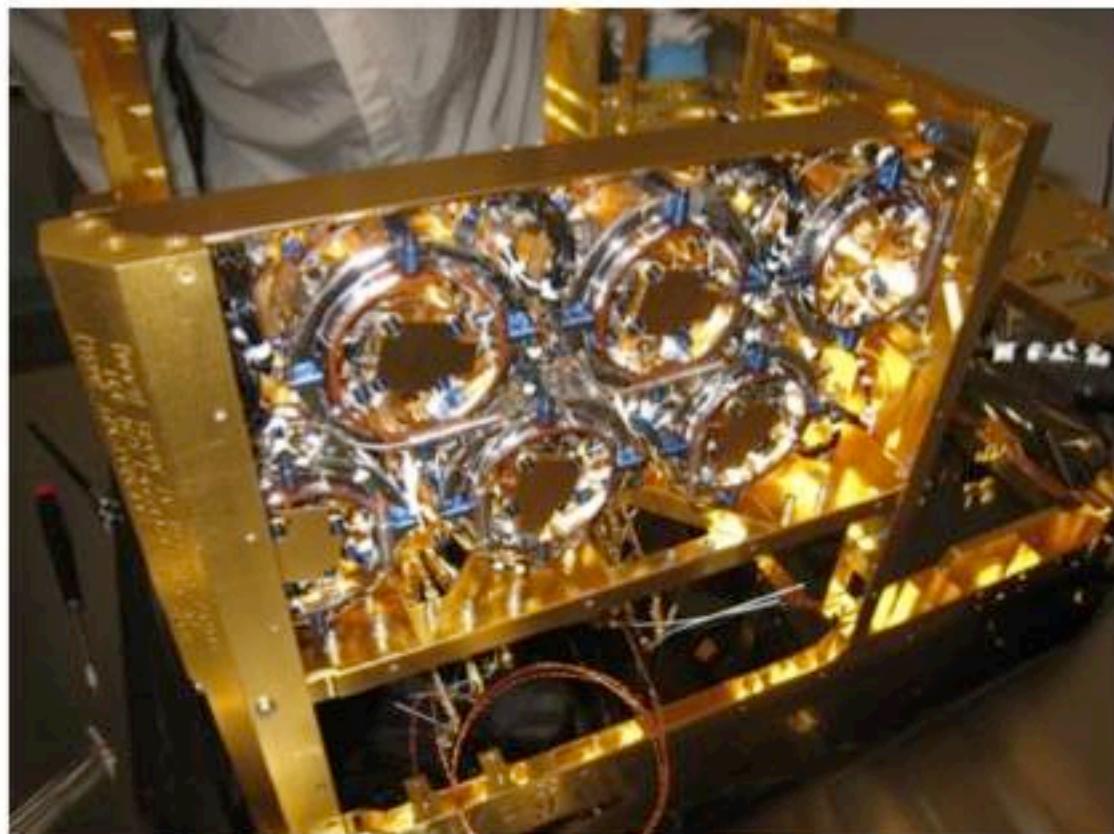


Diameter :
150 km

Central peak
 $H = 5 \text{ km}$

SAM pour Mars

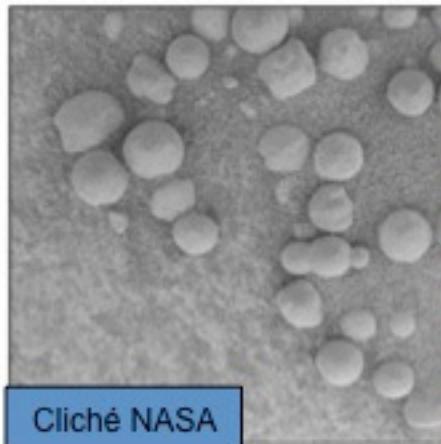
SCHEDULE



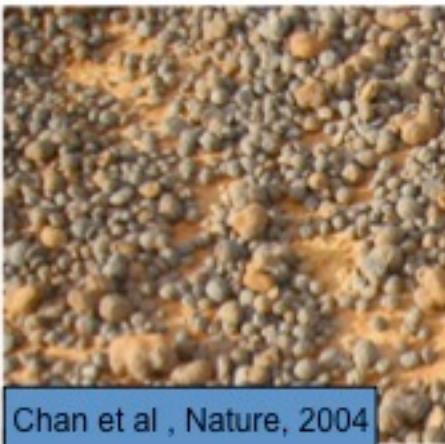
SAM/GC Flight model integrated into SAM

End 2007
GC-FM @ GSFC
2008
AIT SAM 2008
2009-10
TVACs SAM,
GC-MS end-to-end
1st term 2011
SAM-FM @ JPL
March 2011
STT MSL
Mai 2011
FMFT MSL
June 2011
MSL@KSC

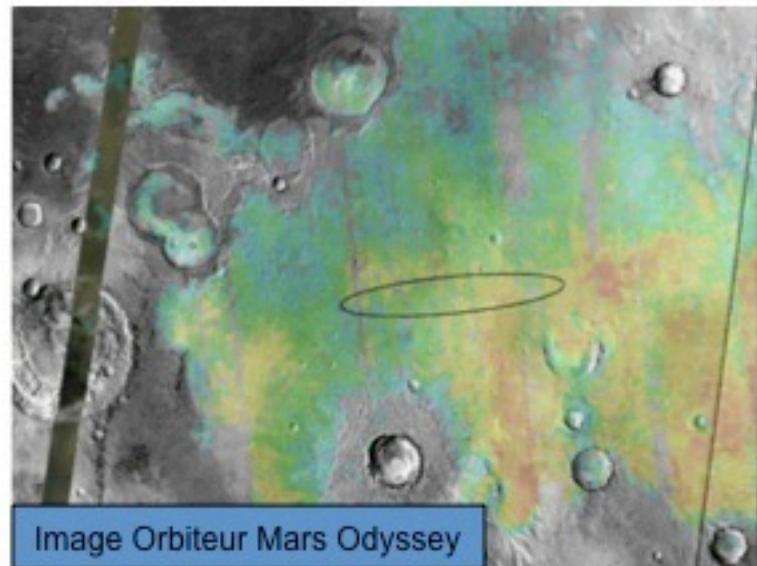
2004 : NASA's rover Opportunity (Equateur) : Blueberries
sub-centimetric hematite spherules
(deposits in acidic water)



Meridiani Planum

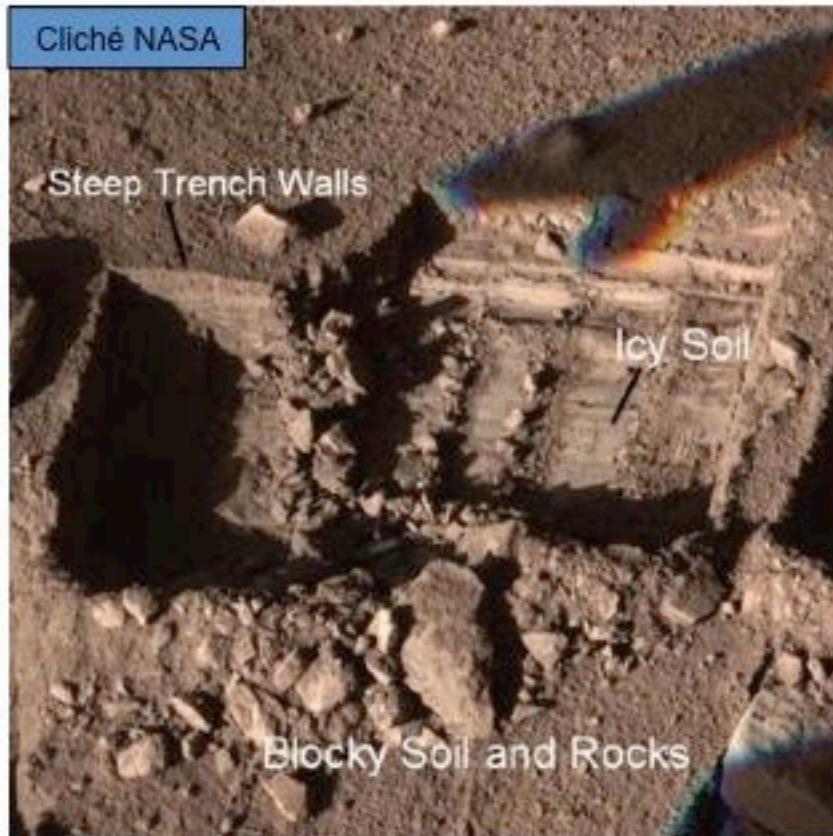
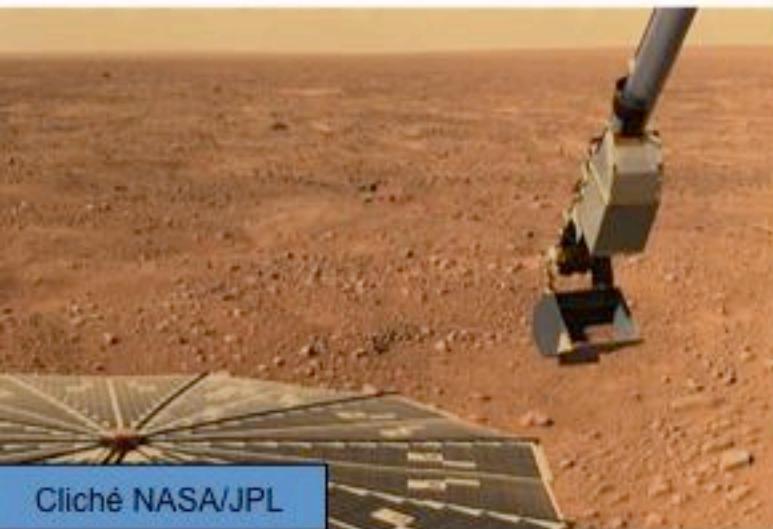


Monument Valley



2008 : NASA's Lander Phoenix (@ Vastitas Borealis) :

Perchlorates ($MgClO_4$ etc.) in the ground,
Water ice at some cms depth





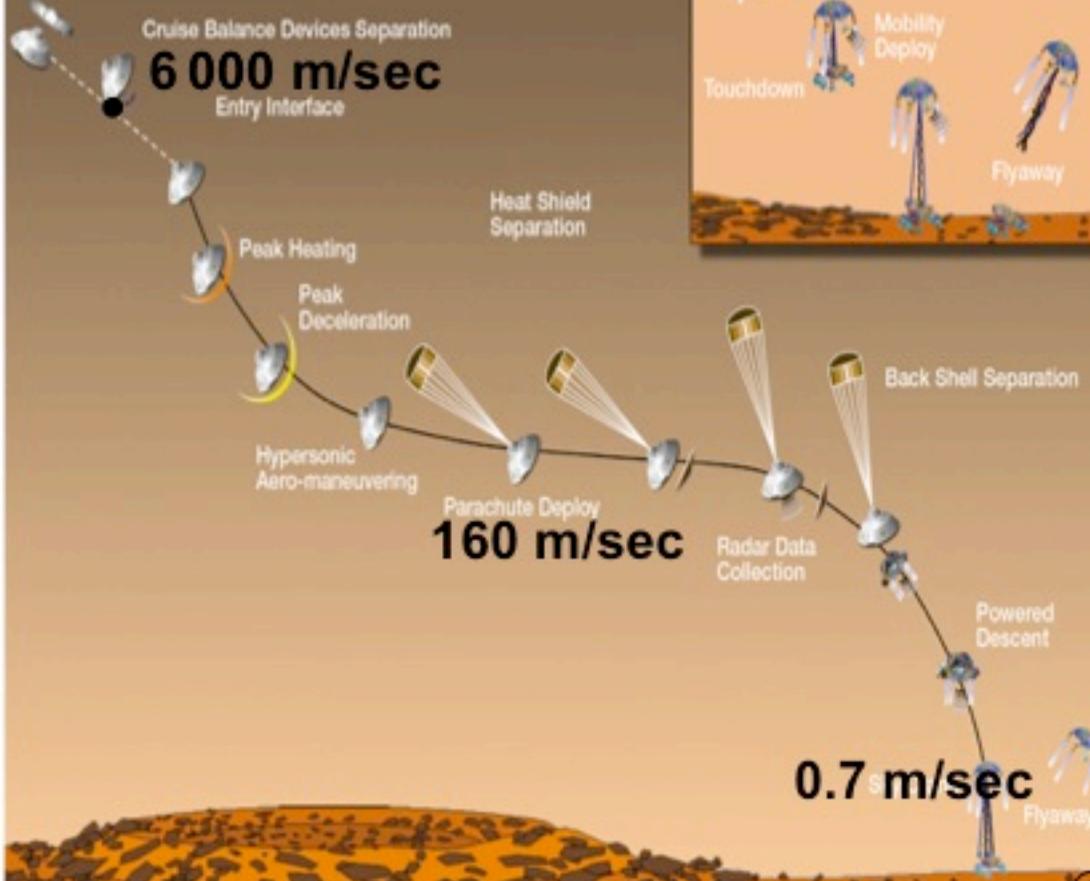
Nov. 26th 2011

Exploration de Mars

Entry

10:24:33.8 PM PDT

125 km



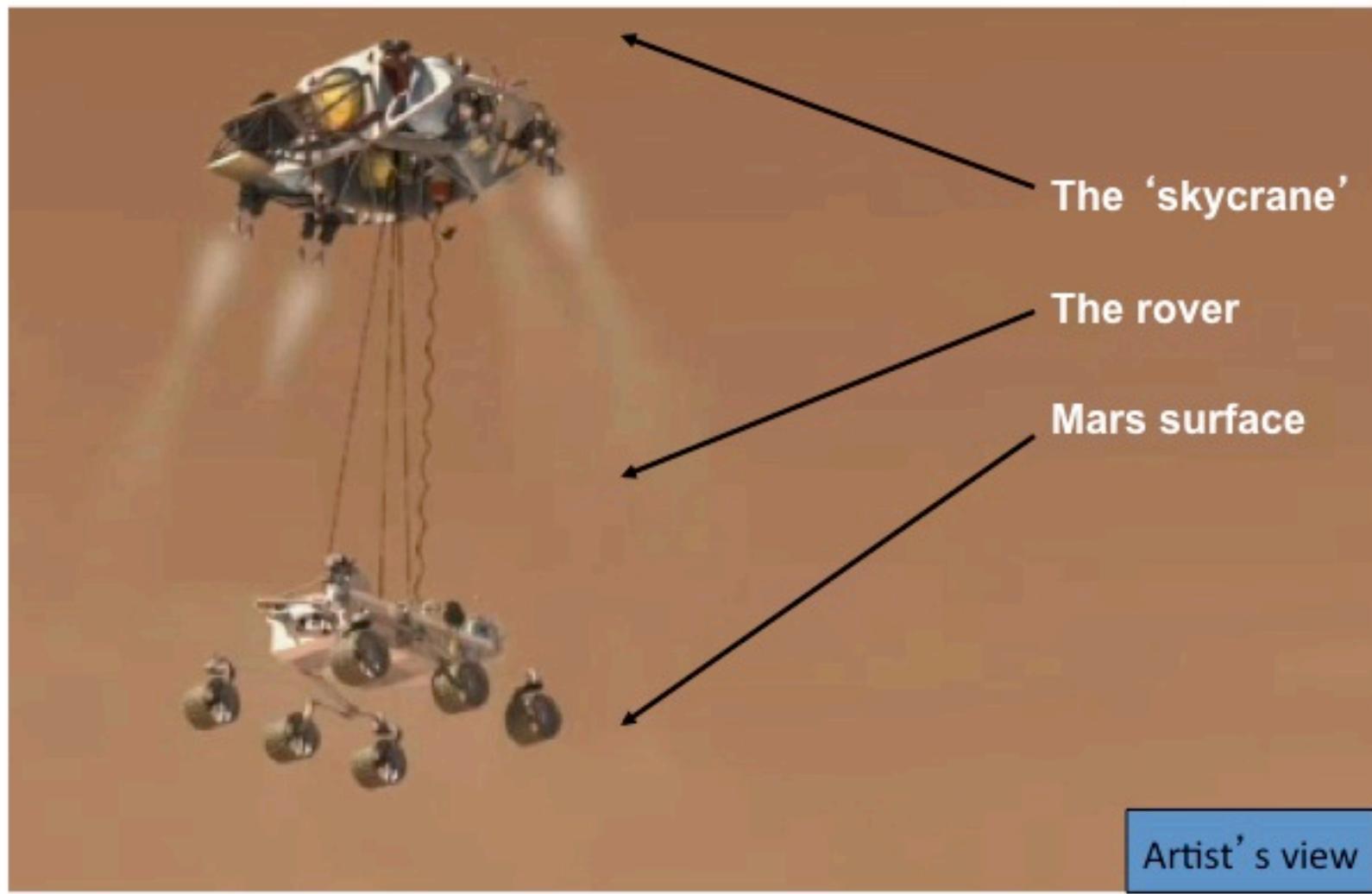
The
seven
minutes
of
terror

Aug. 5th 2012
($L_s = 151^\circ$)

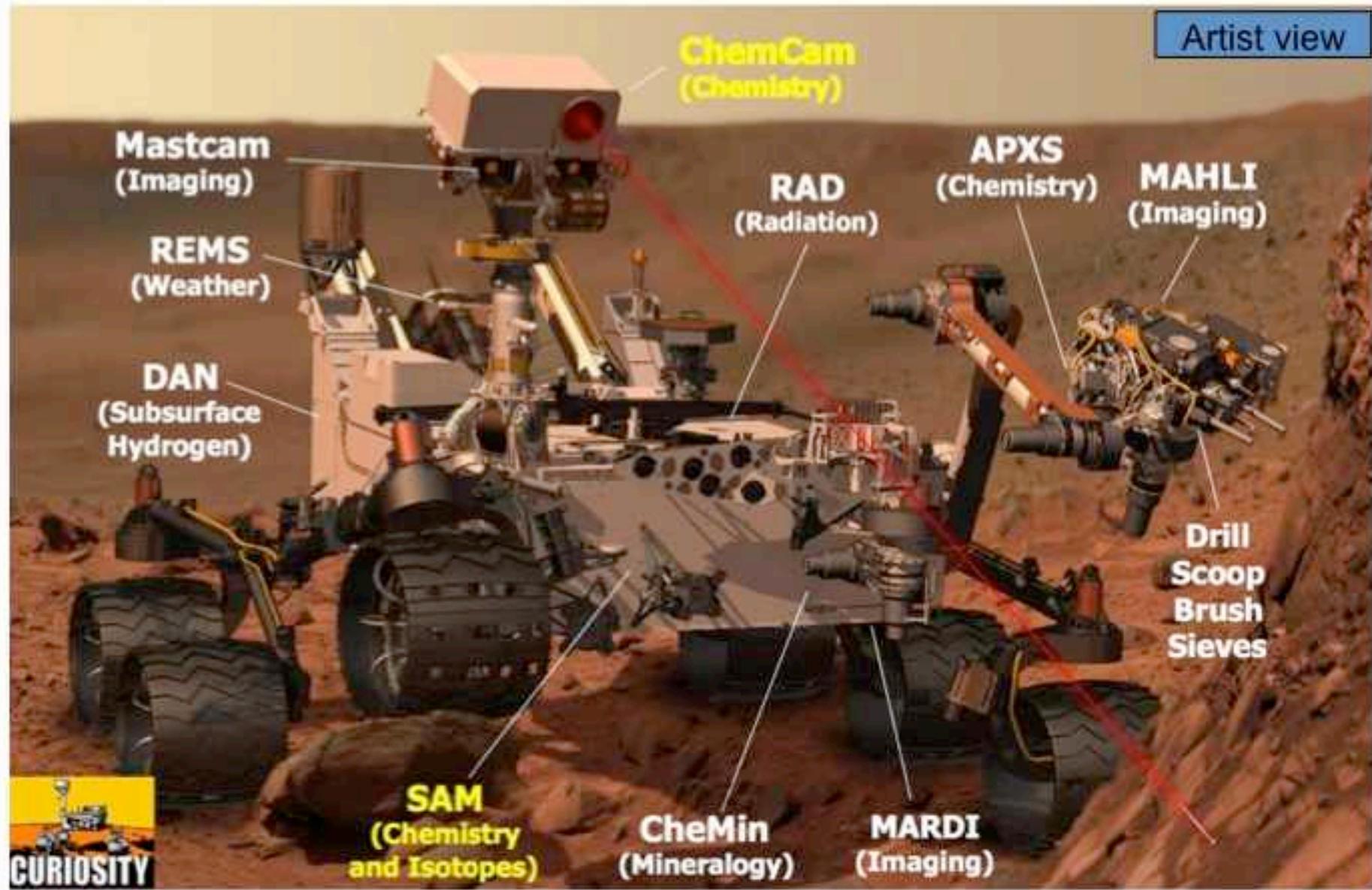
Soft landing
5.4° S 137.8° E

10:31:45.4 PM PDT

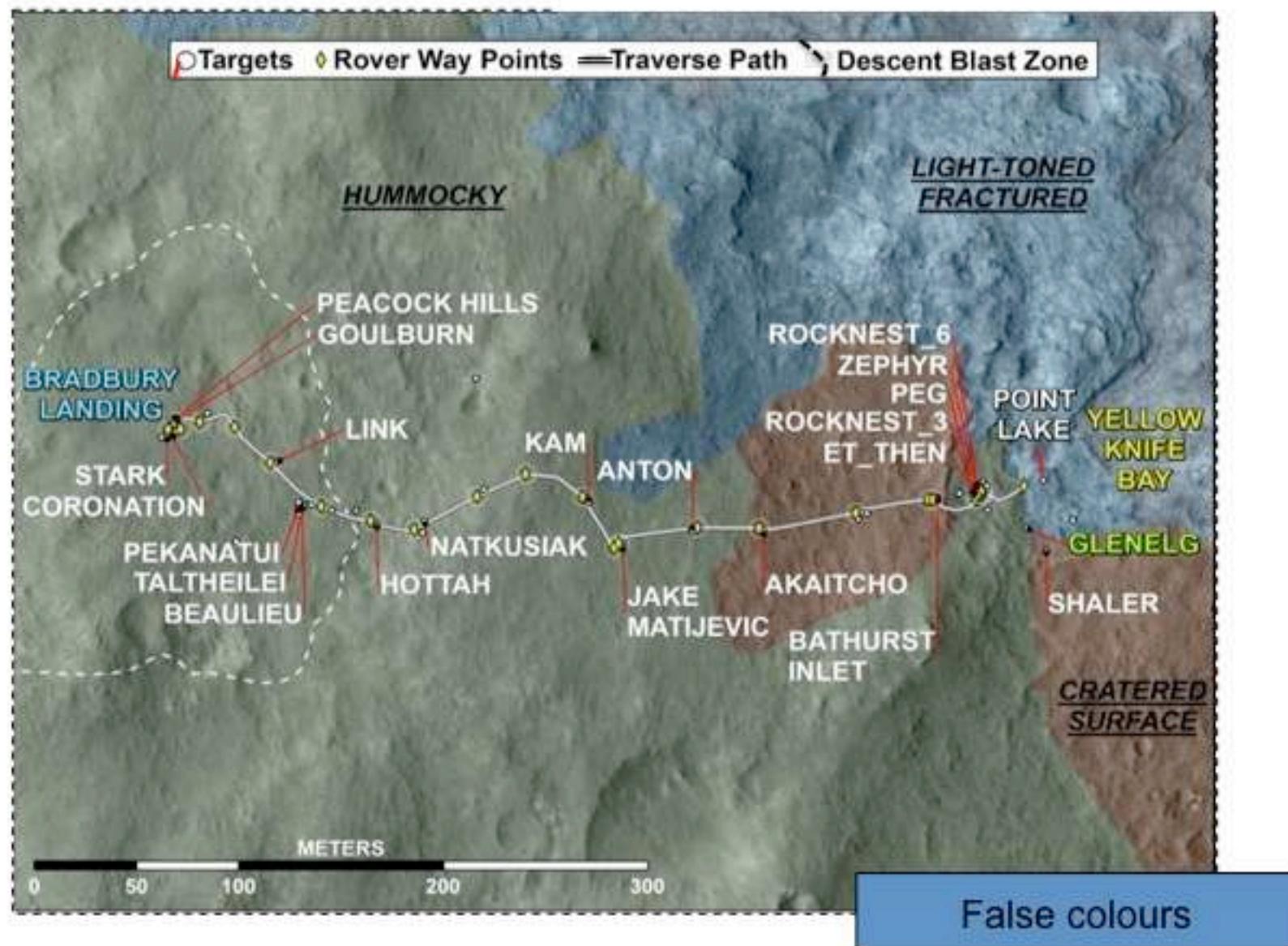
Exploration de Mars



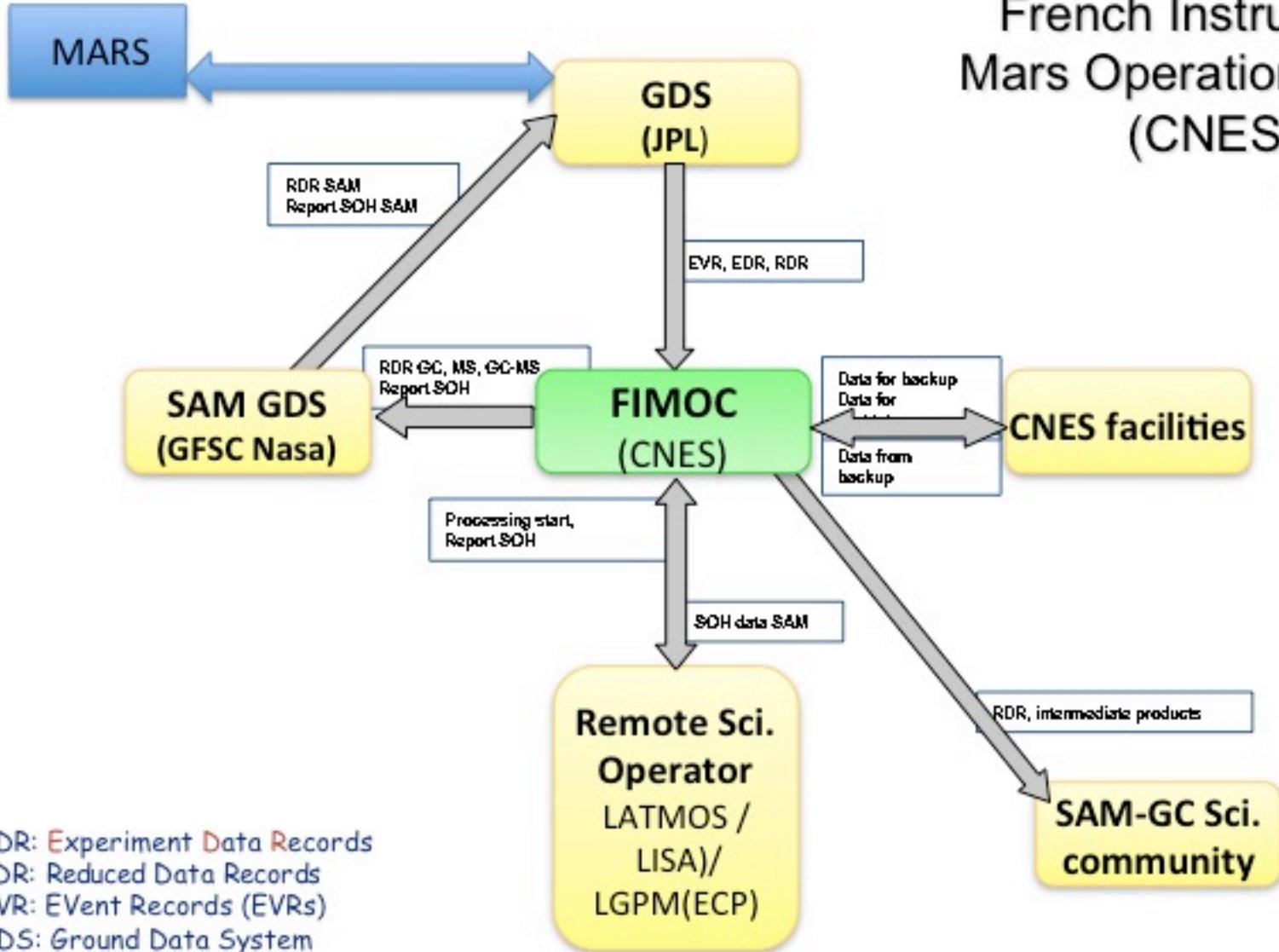
Exploration de Mars



Exploration de Mars



Exploration de Mars



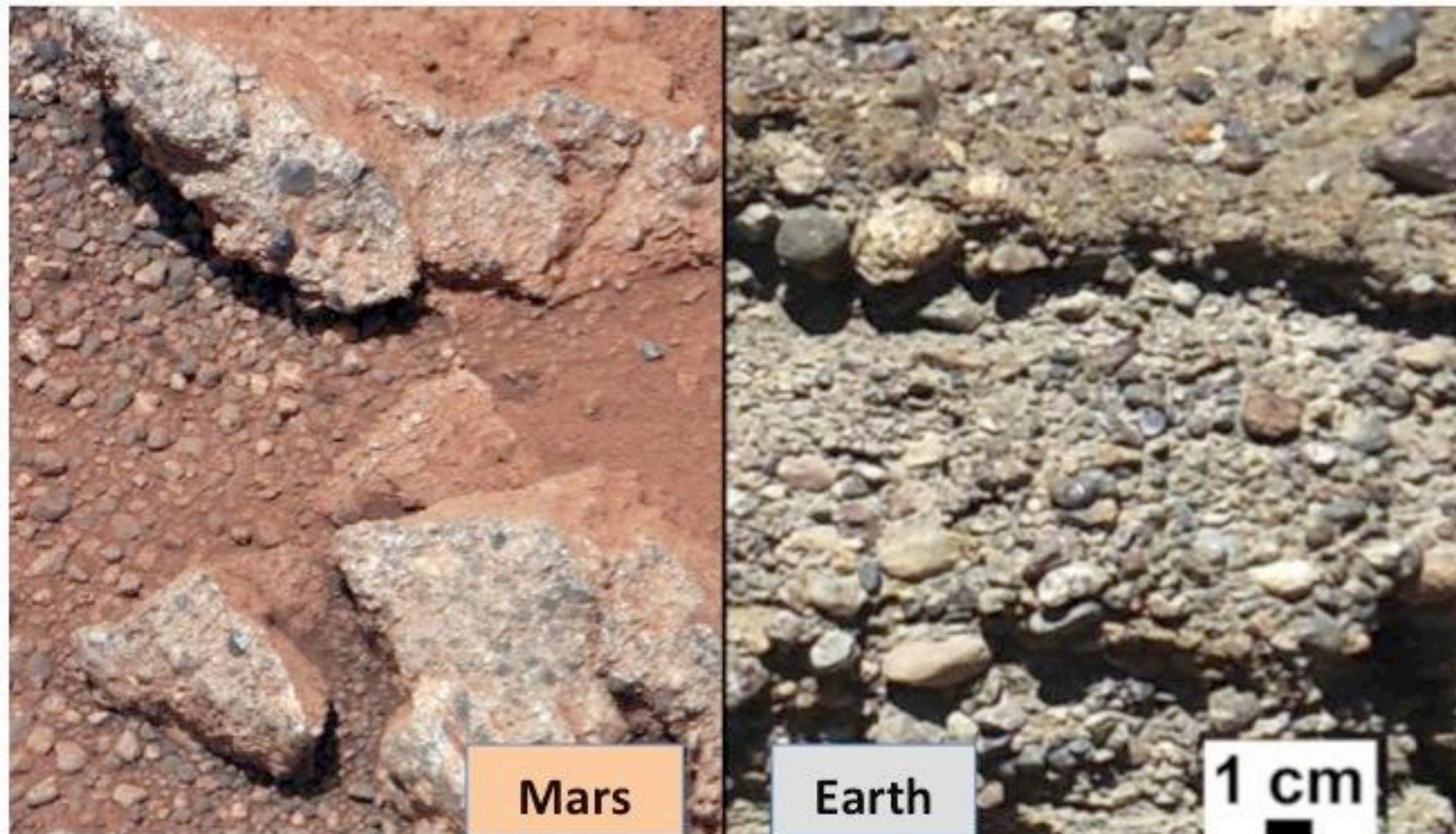
The FIMOC in Toulouse : French Instruments Mars Operation Center (CNES)

E. Lorigny

EDR: Experiment Data Records
RDR: Reduced Data Records
EVR: Event Records (EVRs)
GDS: Ground Data System
SOH: State Of Health

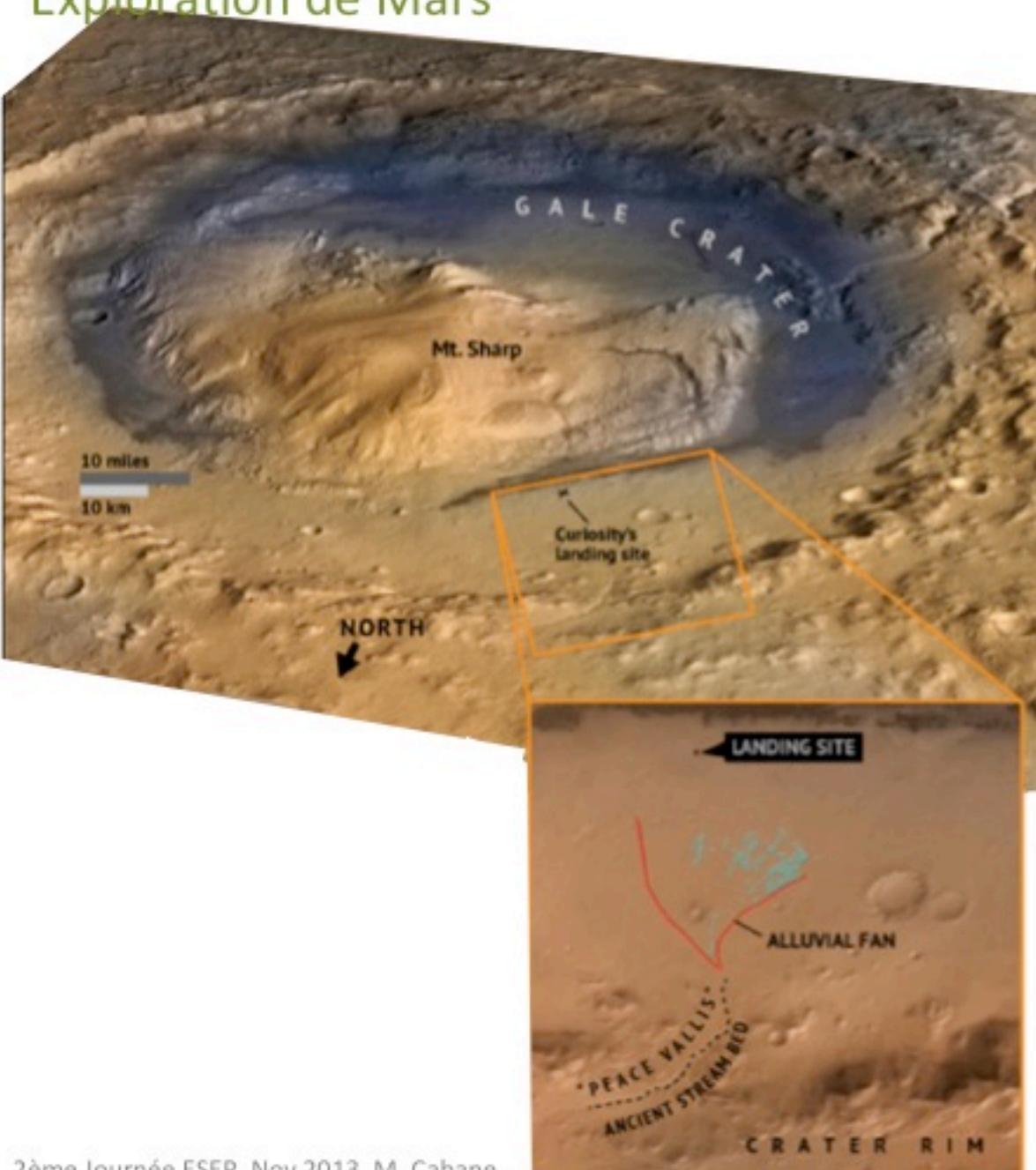
Exploration de Mars

Sol 27



.... Strong water flows on Mars (m/sec, sub-metric depth)

Exploration de Mars



Confirmation :

Un flux continu d'eau provenant de Peace Vallis est descendu dans Gale, créant un dépôt alluvial sur le plancher du cratère. Vitesse estimée 1m/sec Profondeur 20 cm à 1,20 m.

ATMOSPHERE

SAM

Sol 79

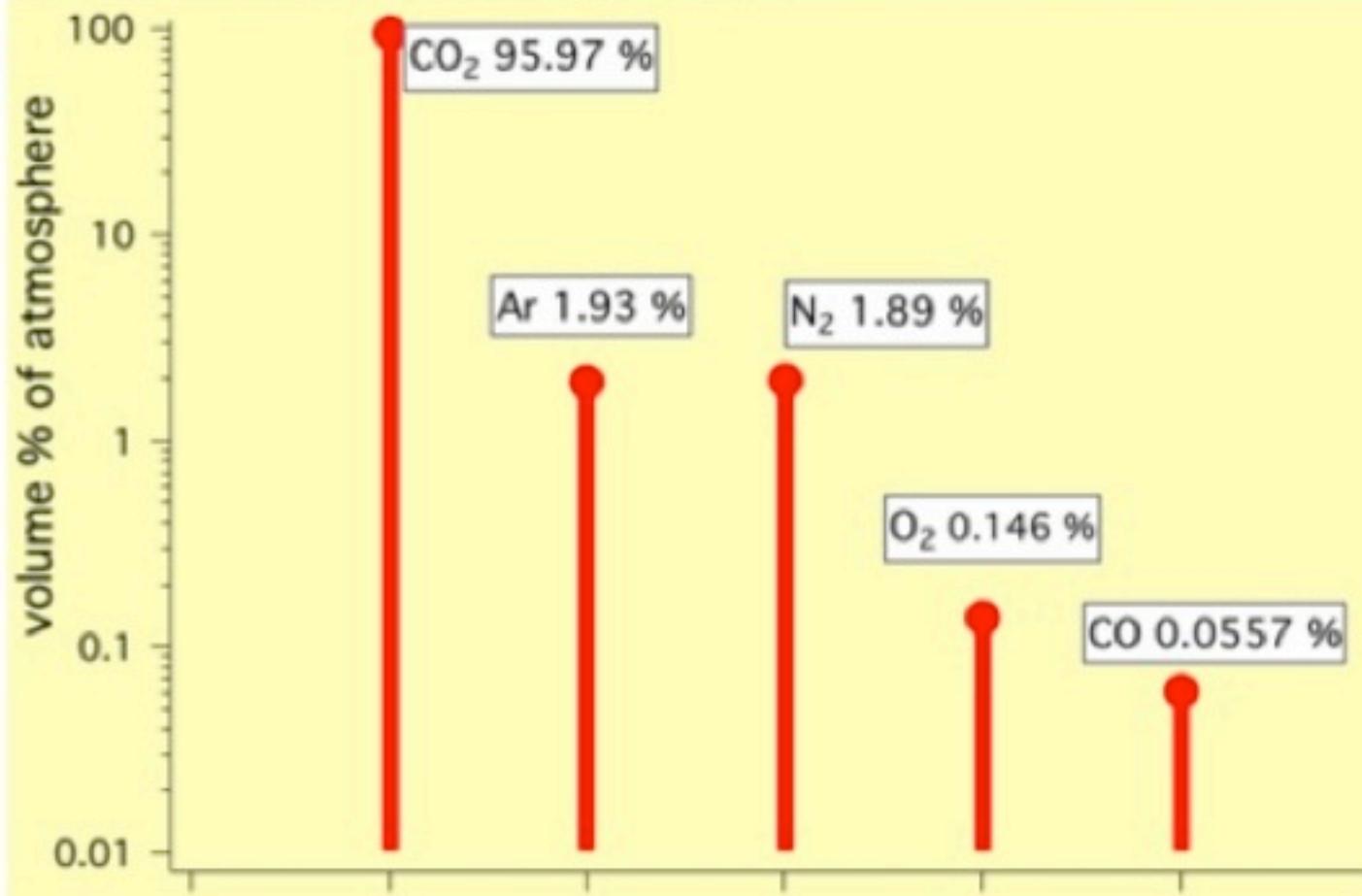


Figure 1. Volume mixing ratios for major atmospheric species. In contrast, Viking reported 2.7% and 1.6% for N₂ and Ar mixing ratios respectively.

Exploration de Mars

ATMOSPHERE

Nitrogen : SAM/Viking = 0,70

Argon : Sam/Viking = 1,21



ORIGIN :

'primordial planetary accretion.'

ORIGIN :

'desint. of K, half-life 1,3 Ga'

Exploration de Mars



Scooping

Sol 93

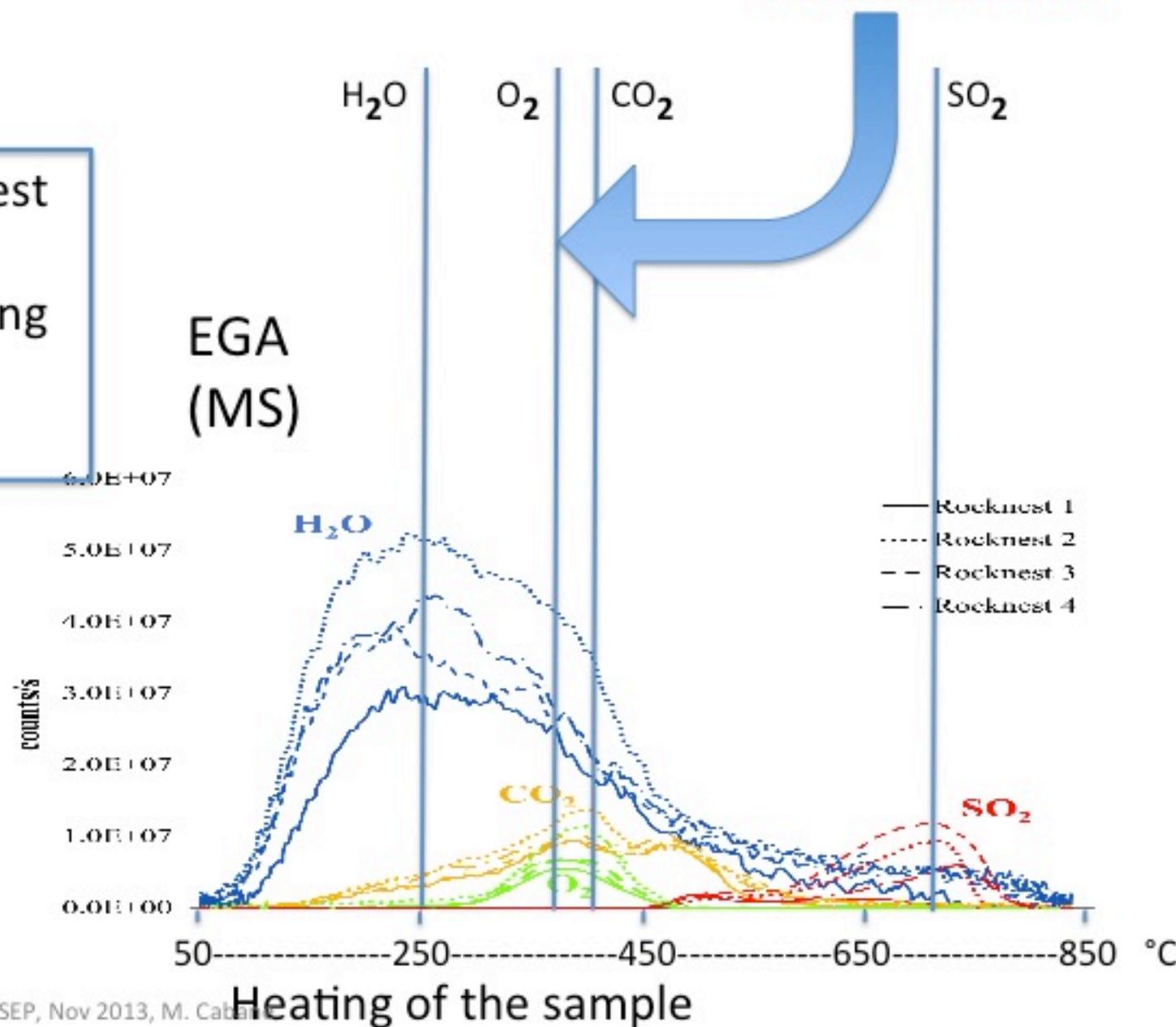


Exploration de Mars

Perchlorates !!

Rocknest
Scooping
Sand

EGA
(MS)



Exploration de Mars

John Klein

Drilling

Rock



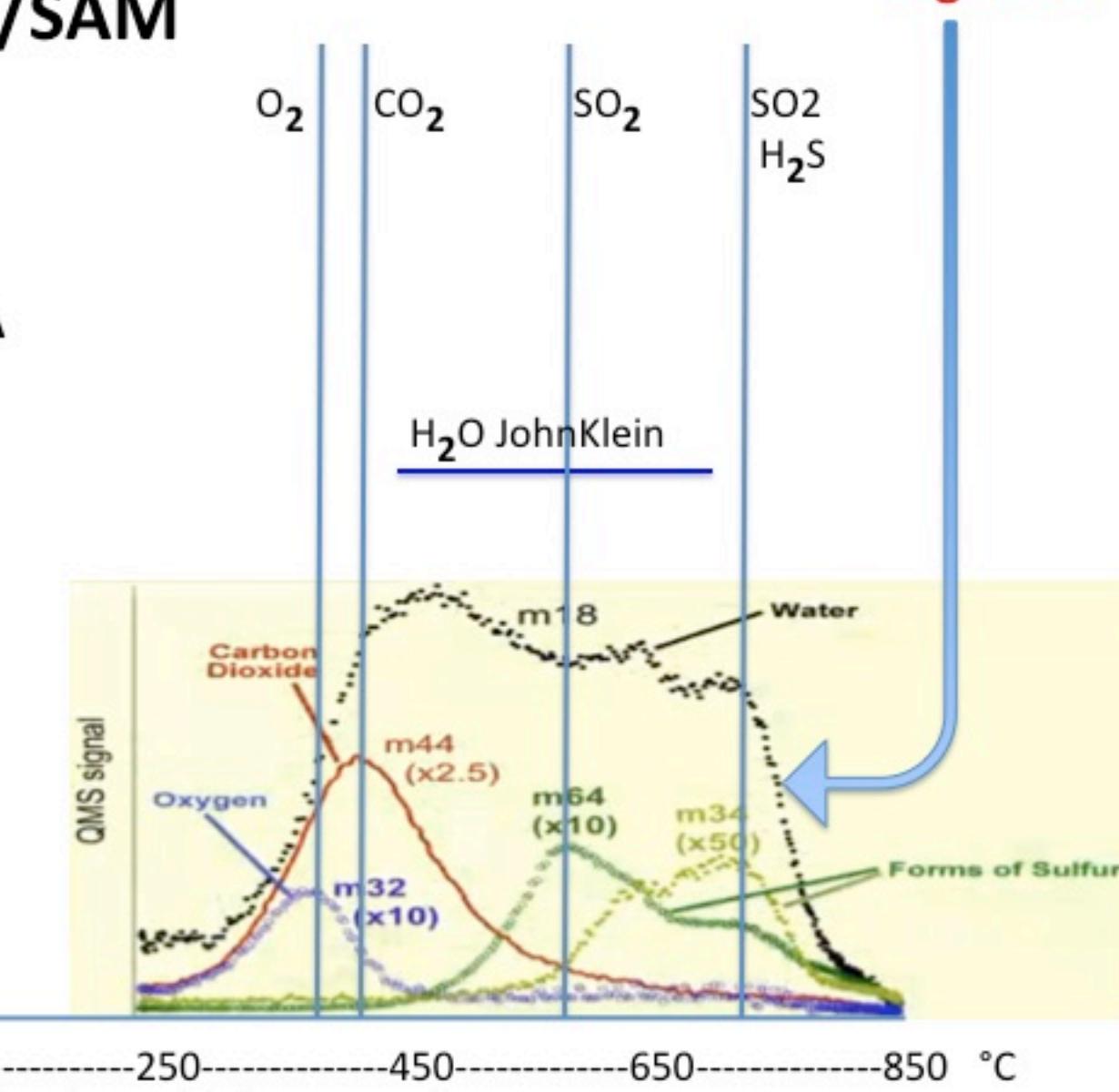
MS/SAM

Argiles !!

John Klein
Drilling
Rock

EGA

Heating of the sample



ATMOSPHERIC METHANE (TLS)

$\text{CH}_4 = 0.18 +/_ 0.67 \text{ nanomole/mole (ppb)} ^*$

0 – 1.3 ppb at 2 sigmas (95% confident)

Mars observed from Earth : <1 to 50 ppb

..... from a martian orbit : <3 to 70 ppb

depending on seasons and N/S/Eq. observations

... expected @ Gale (S. Atreya, private comm.) : 5 to 35 ppb

$t_{\text{atm. mixing}}$: 6 months

$t_{\text{photo. destroying}}$: 300 years

* $\text{CH}_4 / \text{Earth} : 1700 \text{ ppb} = 1650_{\text{life}} + 50_{\text{geology}}$

Understanding SAM results

On Earth :

- Simulations using the testbeds (TB) (... + analogs + etc.)

TB = FS in lab (**in Mars conditions**)

@ GSFC/NASA : full TB of SAM and TB of MS

@ JPL/NASA : TB of TLS

@ LATMOS-LISA-ECP/U.Paris : TB of GC

- Lab. work using commercial instruments

Exploration de Mars



NASA/JPL-Caltech
MSSS

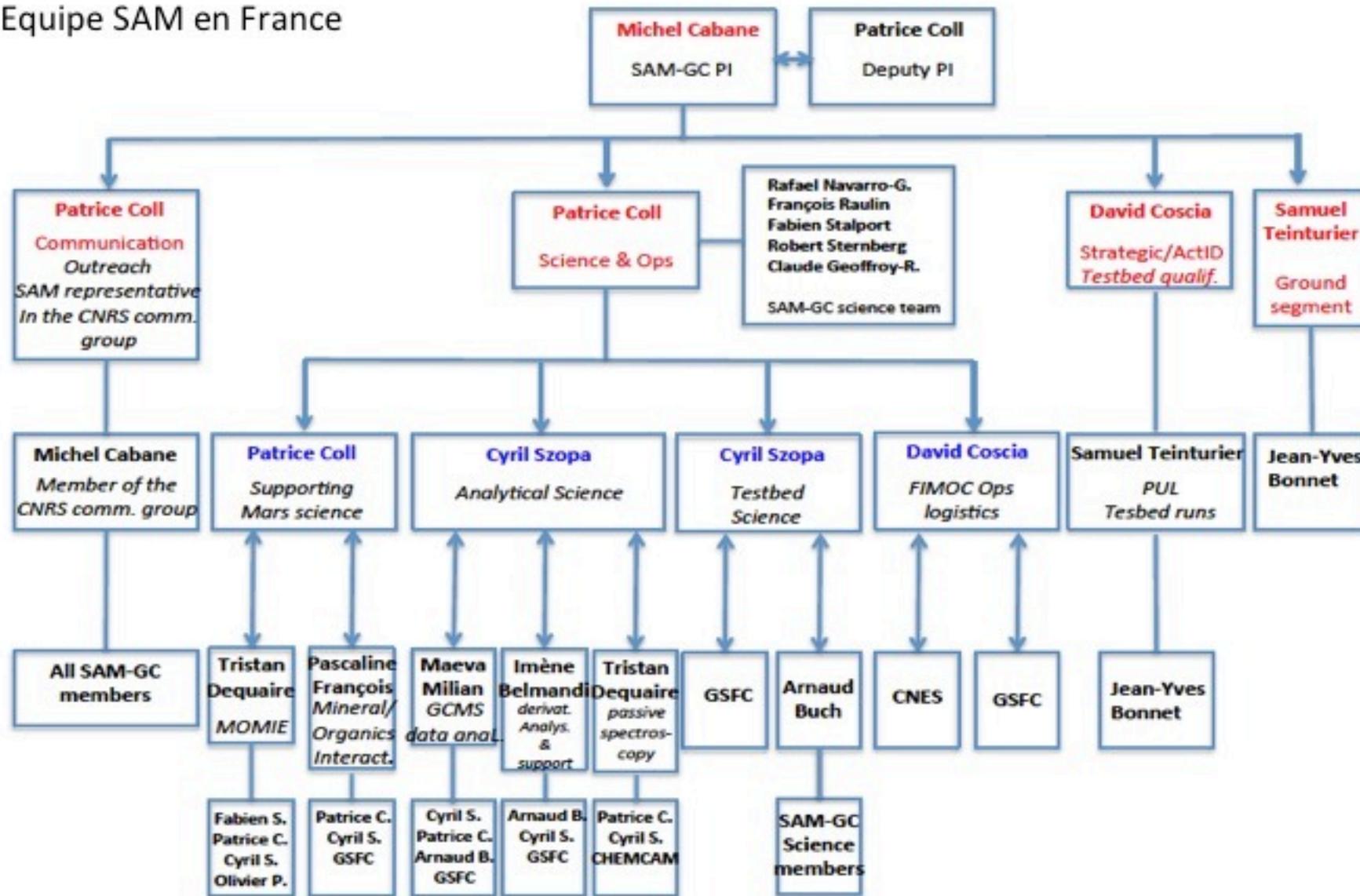
Exploration de Mars



Laboratoire Inter-Universitaire
des Systèmes Atmosphériques



Equipe SAM en France



Opérations Curiosity sur Mars ; 2012 ...

En parallèle :

Phobos-Grunt (GAP) (IKI) ;  ! ! 2011

Rosetta (COSAC) (ESA) ; Arrivée 2014

Exomars 2018 (MOMA) (ESA) ; Départ 2018

Mars2020 AO/NASA 2013-14 ... Départ 2020 ?

Luna Resours (IKI) ? ... Départ 2017 ?

Mission Lune ESA ?

Reflight P-G (IKI) ? ..

Etc.

Exploration de Mars



*Laboratoire Inter-Universitaire
des Systèmes Atmosphériques*



Exploration de Mars : à suivre ce jour :

C Szopa. : R&T développées entre LATMOS, LISA et Centrale sur l'analyse in situ d'organiques dans le futur

P. Coll : Recherche de molécules organiques à la surface/sous-surface de Mars

Merci de votre attention !

