



CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES

REFERENTIEL NORMATIF du CNES RNC

Référence CNES: **RNC-CNES-TM-502**
Version 1 du 06 février 2007

Référence source : **DCT/DA/AF/2006-0007731**

MEMORANDUM TECHNIQUE

**Définition et utilisation des « TRL »
pour les systèmes orbitaux et les
systèmes de transports spatiaux**

ACCORD du Bureau de Normalisation	BN n° 30 du 08/01/07
APPROBATION Président du CDN Alain CUQUEL	

PAGE D'ANALYSE DOCUMENTAIRE

TITRE : DEFINITION ET UTILISATION DES « TRL » POUR LES SYSTEMES ORBITAUX ET LES SYSTEMES DE TRANSPORTS SPATIAUX	
MOTS CLES : TRL, Technology Readiness Levels	
NORME EQUIVALENTE : Néant	
OBSERVATIONS : Néant	
<p>RESUME : L'objet de ce document est de préciser pour les systèmes orbitaux et les lanceurs :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les définitions des différents niveaux de TRL hardware et software • Les principes d'utilisation dans le cadre de la R&T, des projets et du processus de « roadmapping ». 	
<p>SITUATION DU DOCUMENT : Ce document fait partie des documents associés à la catégorie des « Notes techniques » du Référentiel Normatif du CNES (RNC). Il n'est pas applicable, il a un caractère informatif.</p>	
NOMBRE DE PAGES : 21	LANGUE : Française
Progiciels utilisés / version : Word 2000	
SERVICE GESTIONNAIRE : Inspection Générale Direction de la Fonction Qualité (IGQ)	
AUTEUR(S):	DATE : 06 février 2007
<p>Groupe de travail « TRL généraux »</p> <p>Groupe de travail « TRL logiciels »</p> <p><i>Cf. page de signatures du document origine</i></p>	

© CNES 2007

Reproduction strictement réservée à l'usage privé du copiste, non destinée à une utilisation collective (article 41-2 de la loi n°57-298 du 11 Mars 1957).

SUIVI DES VERSIONS DU DOCUMENT RNC

VERSION	DATE	PAGES MODIFIEES	OBSERVATIONS
1	06/02/2007		Suite au BN n° 30 du 08/01/07 introduction dans le RNC du document DCT/DA/AF/2006- 0007731.


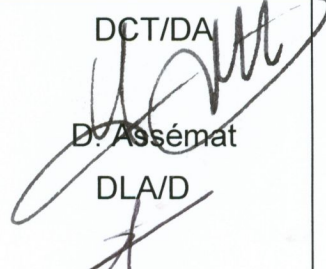
MODALITES PARTICULIERES D'APPLICATION

Pas de modalités particulières

DIRECTION DU CENTRE DE TOULOUSE
DIRECTION ADJOINTE

DIRECTION DES LANCEURS

Définition et utilisation des « TRL » pour les systèmes orbitaux et les systèmes de transports spatiaux

Préparé par :	Groupe de travail « TRL généraux »: A. Cadiou, A. Mazain, D. Lacroix, J-F Gory, P. Le Torrivellec, F. Durand-Carrier, F. Cahuzac, I. Rongier. Groupe de travail « TRL logiciels » : D. Séguela, C. Lambert, P. Arberet, G-H Mingot, D. Fournier, P. Saunier, F. Durand-Carrier.	Pour les groupes  le 06/02/07 F. Durand-Carrier DCT/DA/AF
Autorisé pour application par :		DCT/DA  D. Assémat DLAD M. Eymard

Diffusion :

DCT/D, DCT/DA, DCT/SI, DCT/TV, DCT/AQ, DCT/OP, DCT/IB, DCT/PO, DCT/RF, DCT/SA, DCT/SB, DCT/PS

DLA/D, DLA/A, DLA/SFR, DLA/SDE, DLA/SDT, DLA/SDS, DLA/AQ

IGQ/D, IGQ/QC, IGQ/QC/QM

DSP/D, DSI/D, CSG/D

Membres des groupes de travail

* Rq : Cette révision prend en compte les systèmes de transports spatiaux, elle est identique à la version précédente en ce qui concerne les systèmes orbitaux. Elle est disponible dans le Référentiel Normatif du CNES.

Définition et utilisation des « TRL » pour les systèmes orbitaux et les systèmes de transports spatiaux

CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES

Siège Centre de Toulouse
2, place Maurice Quentin - 75039 Paris Cedex 01 18, avenue Edouard Belin - 31401 Toulouse Cedex 9
Tél. : 01 44 76 75 00 / Fax 01 44 46 76 76 Tél. : 05 61 27 31 31 / Fax : 05 61 27 31 79

Site Internet : <http://www.cnes.fr>

RCS PARIS B 775 665 912 - SIRET 775 665 912 000 82 / CODE APE 731Z
N° d'identification TVA : FR 49 775 665 912

SOMMAIRE

1	OBJET	3
2	ELEMENTS GENERAUX	3
3	DEFINITIONS	5
3.1	DEFINITIONS GENERALES DES TRL	5
3.2	TRL POUR LOGICIEL	9
4	UTILISATION.....	12
4.1	DANS LE CADRE DE LA R&T	12
4.2	DANS LE CADRE DES PROJETS	12
4.3	POUR LES ROADMAPS.....	12
	REFERENCE :	12
	ANNEXE 1 : DÉFINITIONS DE TERMES	13
	ANNEXE 2 : EXEMPLE D' UTILISATION PROJET (SIMBOL-X).....	14
	ANNEXE 3 : EXEMPLE D' UTILISATION PROJET (VULCAIN-X).....	16

1 OBJET

Les TRL (Technology Readiness Levels) sont les niveaux d'une métrique ayant pour objet l'évaluation de la maturité technologique. Ils permettent cette évaluation de manière systématique et indépendante de la discipline. Cette métrique sert aussi bien les métiers qui développent les technologies que ceux qui les intègrent pour la réalisation de systèmes. Elle permet :

- aux premiers, de standardiser leurs « feuilles de routes technologiques », de gérer des priorités d'actions de recherche, et de communiquer avec des non spécialistes;
- aux seconds, de prendre lors des phases de définition, des décisions d'utilisation/embarquement de technologies en connaissance des risques éventuels liés à leur niveau de maturité.

Neuf niveaux ont été définis par la NASA et sont maintenant utilisés internationalement par de nombreuses industries et agences gouvernementales¹.

L'objet de cette note est de préciser pour les systèmes orbitaux, et les lanceurs :

- les définitions des différents niveaux de TRL hardware et software²,
- les principes d'utilisation dans le cadre de la R&T , des projets et du processus de « roadmapping ».

2 ELEMENTS GENERAUX

Les principes généraux sont les suivants :

- Le premier niveau relève du domaine de la recherche fondamentale et, à ce stade, les agences spatiales sont en général dans une attitude de veille sur les concepts technologiques émergents.
- Atteindre le niveau 2 se concrétise par l'identification d'applications des nouveaux concepts et les travaux se limitent en général à des études « papier ».
- On atteint le niveau 3 dans les laboratoires, par la démonstration expérimentale de la faisabilité des applications.
- Les niveaux 4 puis 5 sont des niveaux de validation par intégration de la nouvelle technologie dans des maquettes. Validation fonctionnelle pour le 4, puis prise en compte de contraintes d'environnement pour le 5.
- On atteint les niveaux 6 et 7 au travers de démonstrateurs (ou de prototypes), testés en environnement représentatif et si nécessaire en vol pour le niveau 7. Cependant toutes les technologies ne nécessitent pas une qualification en orbite préalablement à leur utilisation dans un projet.

¹ L'ESA, la NASA, la JAXA et le CNES ont décidé en juillet 2005 de se coordonner sur la définition et l'utilisation des niveaux TRL.

² Largement inspirées des définitions proposées par la NASA et le DOD

- Enfin, les niveaux 8 et 9 sont atteints dans le cadre de développements de systèmes opérationnels, lors de l'aptitude au vol pour le 8 et de la réussite en mission opérationnelle pour le 9. Ce dernier sera précisé en indiquant la durée d'opération en orbite.

On notera que les TRL sont une évaluation de la maturité effectuée à un moment donné par une organisation à partir des informations auxquelles elle a accès. Ils ne se substituent pas aux cycles de développement ou aux règles de qualité en vigueur, cependant on établit pour les équipements une correspondance entre les TRL et les jalons de développement (revues, ...). On notera également les remarques suivantes :

- les TRL n'évaluent pas la maturité d'une technologie de façon intrinsèque mais prennent en compte l'environnement cible,
- les TRL sont principalement utilisés pour les technologies et les équipements (ils ne traitent pas des systèmes et de la maturité de leur intégration),
- les TRL ne prennent pas en compte la capacité de production industrielle et les contraintes d'accès (e.g : ITAR),
- les TRL ne prennent pas en compte l'obsolescence de la technologie.

3 DEFINITIONS

3.1 DEFINITIONS GENERALES DES TRL

Ces définitions traitent de technologies en général (type « hardware » intégrant éventuellement des « software »).

Définition	Description	Exemples
<p>1 <i>Principes de base observés et identifiés</i></p>	<p>Le plus bas niveau de maturité. La recherche scientifique commence à être transférée à la R&T. A titre d'exemples on peut prendre des études « papier » sur les propriétés de base d'une technologie.</p>	<p><u>Systèmes Orbitaux :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Propulsion plasmique :</i> Découverte scientifique de l'effet Hall. • <i>Accumulateurs :</i> Découverte des principes scientifiques de l'électro chimie. • <i>Matériaux :</i> Découverte des nano tubes de carbone. <p><u>Systèmes de transport Spatial :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Propulsion Cryotechnique :</i> Identification de la réaction exo-énergétique de combinaison de l'hydrogène et de l'oxygène. • <i>Pilotage H8</i> Elaboration de la théorie mathématique de la norme H8 .
<p>2 <i>Concept technologique et/ou application formulés</i></p>	<p>Une fois que les principes de base sont observés, des applications concrètes peuvent être identifiées. Les applications sont encore spéculatives, il n'y a pas de preuve expérimentale ou d'analyse détaillée pour soutenir ces suppositions. A titre d'exemples on peut prendre des concepts limités à des études analytiques.</p>	<p><u>Systèmes Orbitaux :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Propulsion plasmique :</i> Idée d'utiliser l'effet Hall pour éjecter un gaz (travaux du Professeur Morozov en Russie). • <i>Accumulateurs:</i> Idée d'utiliser le lithium pour stocker de l'énergie. • <i>Matériaux :</i> Idée d'utiliser des nano tubes pour charger des colles spatiales afin de les rendre conductrices. <p><u>Systèmes de transport Spatial :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Propulsion Cryotechnique :</i> Idée de maîtriser le stockage de l'oxygène et de l'hydrogène sous un faible volume c'est à dire sous forme liquide et de les combiner dans une chambre de combustion (années1950). • <i>Pilotage H8</i> Idée d'utiliser la théorie de la norme infinie pour la boucle de contrôle d'un système dans la méthode de contrôle robuste H8 . Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une thèse théorique : 1991-94.

<p style="text-align: center;">3 Preuve analytique et expérimentale des fonctions critiques et/ou des caractéristiques du concept</p>	<p>L'obtention de ce niveau comprend à la fois des études analytiques et des études en laboratoire pour valider physiquement les prédictions analytiques de la technologie. A titre d'exemples on trouvera des concepts dont la faisabilité scientifique est démontrée.</p>	<p><u>Systèmes Orbitaux :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Propulsion plasmique :</i> Test d'un modèle de laboratoire de propulseur bi étages pour vérifier que les performances sont améliorées par rapport au mono étage. • <i>Propulsion plasmique :</i> Etudes expérimentales pour quantifier les phénomènes physiques impliqués dans le fonctionnement du propulseur. • <i>Accumulateurs :</i> Caractérisation et quantification en laboratoire de nouveaux matériaux d'électrodes et de nouveaux électrolytes permettant d'améliorer les performances des accumulateurs. <p><u>Systèmes de transport Spatial :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Propulsion Cryo :</i> Démonstration sur un banc de test d'un système d'injection fonctionnant à l'hydrogène et l'oxygène liquide. • <i>Pilotage H8</i> Caractérisation de la faisabilité théorique de l'implantation sur un logiciel embarqué de la méthode H8 appliquée au pilotage système. Travail réalise sur une première activité de R&T dans la période : 1994-97.
<p style="text-align: center;">4 Validation en laboratoire au niveau composant et/ou maquette</p>	<p>Pour valider les fonctions attendues par la technologie, celle-ci sera intégrée dans un ensemble cohérent. Cet ensemble reste relativement de « faible représentativité » comparée au système final éventuel. A titre d'exemples on trouvera des maquettes intégrant des composants hardware ainsi que de la simulation « ad hoc ».</p>	<p><u>Systèmes Orbitaux :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Propulsion plasmique :</i> Maquettes de propulseur à plasma partiellement représentatives du modèle vol soit en terme de performances (poussée, Isp, puissance électrique) soit en terme de tenue à l'environnement. • <i>Accumulateurs:</i> Maquettes d'accumulateur Li-ion partiellement représentatives du modèle vol soit en terme de performances (capacité) soit en terme de tenue à l'environnement. <p><u>Systèmes de transport Spatial :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Propulsion Cryo :</i> Après démonstration sur un montage expérimental de la combustion Lox-Lh2, réalisation de cette combustion sur différents montage permettant la maîtrise des différents paramètres influents. • <i>Pilotage H8</i> Génération d'un contrôleur H8 sur un point de vol, et analyse des performance par comparaison avec l'ancien contrôleur. Travail réalisé lors d'une seconde phase de R&T en 1998-99.

<p style="text-align: center;">5 <i>Validation en environnement représentatif au niveau composant et/ou maquette</i></p>	<p>La représentativité de l'intégration et de l'environnement est sensiblement accrue. La technologie de base doit être intégrée avec d'autres éléments suffisamment réalistes pour que l'application dans son ensemble soit validée (niveau composant, sous-système ou système) dans un environnement «simulé» ou de «forte représentativité».</p> <p>A titre d'exemples on trouvera des composants intégrés et testés dans des laboratoires de forte représentativité du niveau « revue critique de définition (RCD) »</p>	<p><u>Systèmes Orbitaux :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Propulsion plasmique :</i> Essais d'un modèle d'ingénierie (environnement, mesure performances, et durée de vie partielle, ...) permettant de caractériser/qualifier la futur équipement (niveau RCD). • <i>Accumulateurs:</i> Essais d'environnement sur un modèle d'ingénierie permettant de caractériser/qualifier la future batterie (niveau RCD). • <i>Cellules solaires :</i> Un nouveau type de matériau photovoltaïque promettant un gain d'efficacité sera, à ce niveau, validé en l'intégrant dans un véritable réseau de cellules de panneau solaire avec divers éléments (structure porteuse, alimentation/régulation, etc.), et testé avec des moyens de simulation d'environnement spatial (vide thermique, flux solaire, etc...). <p><u>Systèmes de transport Spatial :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Propulsion Cryo :</i> Test au banc d'un démonstrateur de moteur échelle 1 sur un domaine de fonctionnement réduit. • <i>Pilotage H8</i> Validation du contrôleur sur tout le vol avec vérification de toutes les performances. Il s'agit d'une validation complètement simulée. Travail réalisé lors de la phase 1 du programme Ariane 5 en 1999-2000. A fin de cette phase de travaux il a été décidé d'implanter la méthode du H? dans le programme de vol d'Ariane5.
<p style="text-align: center;">6 <i>Démonstration en environnement représentatif (sol ou espace) au niveau modèle ou prototype de système/sous-système</i></p>	<p>Un modèle ou prototype de système ou sous système, allant bien au delà de la maquette de validation est testé en environnement représentatif. (si le seul environnement représentatif est l'environnement spatial, alors le modèle/prototype doit être démontré dans l'espace).</p> <p>A titre d'exemples on trouvera des tests de prototypes dans des laboratoires de forte représentativité du niveau « revue de qualification (RQ) ».</p>	<p><u>Systèmes Orbitaux :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Propulsion plasmique :</i> Tests au sol du modèle de qualification (environnement, mesure performances, et durée de vie). Démonstration des marges par rapport au domaine opérationnel. (niveau RQ). • <i>Batteries:</i> Tests au sol du modèle de qualification (environnement, mesure de performances). Démonstration des marges par rapport au domaine opérationnel. (niveau RQ). <p><u>Systèmes de transport Spatial :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Propulsion Cryo :</i> Réalisation de tests pour l'obtention de la qualification au sol d'un moteur en couvrant tout les domaines de fonctionnement et toutes les conditions d'ambiance que doit rencontrer le moteur en vol. • <i>Pilotage H8</i> Intégration du contrôleur dans le programme de vol et validation avec des équipements réels représentatifs. Ce travail a été réalisé sur la phase 2 du programme Ariane5 en 2000-2001.

<p style="text-align: center;">7 <i>Démonstration en environnement spatial de prototype système</i></p>	<p>Démonstration à l'aide d'un prototype du système réel en environnement spatial. Le prototype doit être très proche et à l'échelle du système opérationnel prévu. Toutes les technologies ne passent pas par ce niveau qui sera en général demandé lorsque l'utilisation de la technologie ou du sous système est critique pour la mission et à relativement haut risque. Ce niveau est alors essentiel pour obtenir la confiance de l'ingénierie système et du management de projet .</p> <p>A titre d'exemples on trouvera des démonstrateurs technologiques embarqués.</p>	<p><u>Systèmes Orbitaux :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Propulsion plasmique :</i> Passer ce niveau était l'objectif du vol du propulseur PPS1350 sur STENTOR (SPT100 en back up). • <i>Batteries :</i> Passer ce niveau était l'objectif du vol des batteries avec accumulateurs de technologie G2 sur STENTOR. • <i>Charge utile télécom :</i> Passer ce niveau était l'objectif du vol du DVB (Digital Video Broadcasting) processeur de STENTOR. Il n'était pas prévu pour une mission commerciale mais uniquement pour des démonstrations de services. • <i>Vol en formation :</i> Caractérisation, en vue des futures missions de vol en formation, du système de métrologie RF sur PRISMA. <p><u>Systèmes de transport Spatial :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Propulsion Cryo :</i> Il n'y a pas d'exemple en Europe de démonstration en environnement spatial de prototype système de moteur Cryo. Par contre sur les moteurs stockables on a réalisé lors du vol V112 en 1998 des essais de ré-allumage en vol d'un moteur AESTUS après phase balistique. • <i>Pilotage H8</i> Non applicable.
<p style="text-align: center;">8 <i>Système réel développé et "Qualifié vol" par test et démonstration (sol ou espace).</i></p>	<p>Par définition, toutes les technologies utilisées dans un système réel ont passé le TRL 8. Ce niveau est l'aboutissement du développement système. Il est prouvé que la technologie peut être utilisée dans la version définitive du système et dans ses conditions opérationnelles.</p> <p>A titre d'exemples on trouvera des technologies intégrées dans des développements ayant franchi les revues de qualification au vol d'un projet.</p>	<p><u>Systèmes Orbitaux :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Propulsion plasmique :</i> Ce niveau a été atteint lors de la revue d'aptitude au vol de SMART1 intégrant le PPS1350. • <i>Batteries :</i> Ce niveau a été atteint lors de la revue d'aptitude au vol de SMART1 et d'un satellite de télécom (lancé en mars 2004) intégrant la batterie Li ion. Le niveau 8 est associé pour chaque projet aux spécificités de son environnement. <p><u>Systèmes de transport Spatial :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Propulsion Cryo :</i> Validation de toutes les performances du moteur et réalisation avec succès des vols de qualification avec confirmation par l'exploitation des données des vols que le comportement du lanceur est conforme aux prédictions des modèles. • <i>Pilotage H8</i> Validation de toutes les performances en ambiance lanceur. Cela a été obtenu après que tous les tests fonctionnels et d'ambiances ont été passés et après que toutes les boucles de vérification systèmes ont été passées. Ce travail a été effectué en 2002-2003, et la fin de ce processus a été officialisé dans le cadre de la Revue de Qualification Système.
<p style="text-align: center;">9 <i>Système réel "Démontré en vol" par mission opérationnelle réussie</i></p>	<p>Par définition, toutes les technologies utilisées avec succès dans un système réel (forme définitive et en conditions opérationnelles) ont passé le TRL 9. Ce niveau sera associé à une durée d'opération en orbite.</p> <p>A titre d'exemples on trouvera des technologies intégrées dans des développements ayant franchi les revues de recette en vol d'un projet.</p>	<p><u>Systèmes Orbitaux :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Propulsion plasmique :</i> Mission réussie de SMART1 avec le PPS1350 pour une durée de 2 ans (égale à la durée totale de la mission). • <i>Batteries :</i> Mission réussie de SMART1 avec la batterie Li ion pour une durée de 2 ans (égale à la durée totale de la mission). Pour la mission sur le satellite télécom, 2 ans en mars 2006 sur environ 15 ans de mission totale. • <i>Télémesure :</i> TM HD sur DEMETER pour environ deux ans de fonctionnement en orbite. <p><u>Systèmes de transport Spatial :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Propulsion Cryo :</i> Le système et son moteur son en exploitation commerciale. • <i>Pilotage H8</i> Réalisation des vols de qualification réussis et confirmation à travers l'exploitation des données de vol que le comportement en vol est conforme aux prédictions. Cette qualification a été acquise lors des vols EAP du vol 517 en 2003.

3.2 TRL POUR LOGICIEL

Dans le domaine de l'informatique (bord & sol) les TRL permettent d'évaluer :

- des algorithmes (pe : réseaux de neurone, compression, codage/modulation des signaux, protocoles,...),
- des « technologies » et outils afférents (pe : différents langages et compilateurs, XML, UML, ADA, VHDL...),
- des produits et/ou composants logiciels réutilisables (pe : moniteurs temps réel, système de gestion bord, operating system, décodeur viterbi,).

Il n'est pas intéressant/envisagé d'appliquer les TRL aux couches applicatives des logiciels développés spécifiquement pour les projets. Dans le cas d'un projet en développement, l'évaluation de la maturité doit essentiellement être effectuée grâce aux jalons du cycle de développement.

Définition	Description	Exemples
<p>1 <i>Principes de base observés et identifiés</i></p>	<p>Le plus bas niveau de maturité. Un nouveau concept logiciel est en cours d'investigation dans le monde de la recherche. On évalue les propriétés de base de méthodes, d'algorithmes ou de formulations mathématiques (mené en général hors du domaine spatial)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Compression d'images</i> : Définition par les physicien/mathématiciens Grossmann & Morlet des bases d' « ondelettes ». Puis, définition du principe de l'analyse multi résolution par Meyer et Mallat.
<p>2 <i>Concept technologique et/ou application formulés</i></p>	<p>Une fois que les principes de base sont observés, des applications concrètes peuvent être inventées. Les applications sont encore spéculatives, il n'y a pas de preuve expérimentale ou d'analyse détaillée pour soutenir ces suppositions. A titre d'exemples on peut prendre des concepts limités à des études analytiques et des expérimentations où les principes de base sont codés et traités avec des données synthétiques (mené en général hors du domaine spatial)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Compression d'images</i> : Identification de la possibilité de compression d'images spatiales basée sur l'analyse multi résolution.
<p>3 <i>Preuve analytique et expérimentale des fonctions critiques et/ou des caractéristiques du concept</i></p>	<p>La faisabilité du concept est démontrée par des études analytiques et des développements en laboratoire. Les développements sont limités (fonctions critiques pour valider les prédictions analytiques) et les expérimentations n'utilisent que des petits jeux de données représentatifs.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Compression d'images</i> : Développement d'une maquette d'algorithme de compression temps réel. Cette maquette labo tourne avec des jeux de données simulés et limités. • <i>Planification sous contrainte</i> : Développement d'une maquette d'un algorithme de planification temps réel sous contraintes. Cette maquette de laboratoire tourne avec des jeux de données limités. • <i>Technologie et outils JAVA/UML</i> : Vérification sur des exemples d' « école » de la génération de code JAVA temps réel à partir de modèles UML.

<p>4 <i>Validation en laboratoire au niveau module et/ou sous système</i></p>	<p>Pour valider le concept système, les modules de base sont intégrés pour fonctionner dans un ensemble cohérent. Cette représentation reste relativement de « faible représentativité » en terme de robustesse et d'efficacité comparée au système final éventuel.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>SCAO :</i> Utilisation de la technique du « coupe sinus » pour l'estimation de l'attitude et de l'accélération du satellite (Microscope). L'algorithme a été validé sur des données réalistes mais sur une station de travail (environnement simulé).
<p>5 <i>Validation en environnement représentatif au niveau module et/ou sous système</i></p>	<p>Réalisation de prototypes conforme aux environnement/interfaces cibles et testés avec des données réalistes. Les interfaces avec les systèmes/ sous systèmes existants peuvent être simulées.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Compresseur d'images :</i> Tests de validation sur un prototype de compresseur d'images avec des flux de données réalistes (débits réels, détecteur simulé). • <i>Commande & contrôle :</i> Développement d'un prototype sol permettant la validation du livre rouge CCSDS (SM&C et AMS) à partir de composants réel du centre de contrôle et de données réelles satellite. • <i>Commande & contrôle :</i> Prototype de traitement sol de la « TM intelligente » par un maquettage sur un environnement simulé à partir de données réelle pour caractériser les gains obtenus.
<p>6 <i>Démonstration en environnement représentatif de bout en bout au niveau prototype de système/sous-système (sol ou espace)</i></p>	<p>Réalisation de prototypes conforme aux environnement/interfaces cibles et testés aux limites. Intégration partielle aux interfaces avec les systèmes/ sous systèmes réels (hardware et software). La faisabilité technique et opérationnelle est pleinement démontrée.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Compresseur d'images :</i> Test en environnement représentatif (données réelles, fonction réalisée sur ASIC, ...) d'un prototype de compresseur d'images basé sur l'analyse multi résolution. • <i>Réseaux TTC :</i> Développement et validation des fonctions de SLE management dans le cadre du projet HOMERE (Harmonisation Opérationnelle du Management et des Echanges au sein des REseaux TTC du CNES) • <i>SCAO :</i> Test du code généré pour les fonctions SCAO (projet PRISMA) sur machine cible dans un environnement simulé. • <i>Calculateur embarqué :</i> Validation des possibilités d'utilisation de l'OS temps réel RTEMS pour le logiciel de vol central Pléiades. Tourne sur simulateur avec le vrai calculateur et le vrai logiciel de vol. • <i>Traitement d'images :</i> Test des performances d'un logiciel de notation automatique de la couverture nuageuse des scènes SPOT sur des données archivées.
<p>7 <i>Démonstration en environnement opérationnel de prototype système</i></p>	<p>Démonstration à l'aide d'un prototype du système réel en environnement opérationnel. Le passage par ce niveau sera demandé en cas de forte criticité et haut risque pour la mission. Ce niveau est alors essentiel pour obtenir la confiance de l'ingénierie système et du management de projet.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Contrôle d'orbite autonome (COA):</i> Logiciel de COA intégré dans le TOPSTAR 3000 (Calcul delta V, et des instants de poussée) pour contrôler automatiquement l'orbite à bord. Démontré sur DEMETER à titre expérimental.

<p style="text-align: center;">8</p> <p style="text-align: center;"><i>Systeme reel developpe et "Qualifie operationnel" par test et demonstration (sol ou espace).</i></p>	<p>Par definition, toutes les technologies utilisees dans un systeme reel ont passe le TRL 8. Ce niveau est l'aboutissement du developpement systeme. Il est prouve que la technologie peut etre utilisee dans la version definitive du systeme et dans ses conditions operationnelles.</p> <p>A titre d'exemples on trouvera des technologies ayant franchi les revues de qualification au vol d'un projet.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Segment sol de controle :</i> Les modules G1, G2, G3,G4 du PGGs (Proteus Genérique ground segment) PROTEUS juste avant le lancement JASON1. • <i>Calculateur embarque :</i> Validation operationnelle (pour aptitude au vol de STENTOR) du mecanisme permettant d'ecrire au sol des IP « Interpreted Program », de les valider, et de les charger pour execution a bord.
<p style="text-align: center;">9</p> <p style="text-align: center;"><i>Systeme reel "Dmontre en mission" par mission operationnelle reussie</i></p>	<p>Par definition, toutes les technologies utilisees avec succes dans un systeme reel (forme definitive et en conditions operationnelles) ont passe le TRL 9.</p> <p>A titre d'exemples on trouvera des technologies ayant franchi les revues de recette en vol d'un projet.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Compresseur d'images :</i> Compresseur d'images a taux variable regule utilise sur SPOT5 HELIOS2. • <i>Technologie et outils ADA :</i> Compilateur ADA de TLD pour MA3 1750 : utilise pour produire les logiciels de vol SPOT5 HELIOS2 , • <i>Segment sol de controle :</i> CMSG/ADEL : base utilisee pour la fonction mecanique spatiale de centres de controle JASON1, DEMETER, SPOT5,

4 UTILISATION

4.1 DANS LE CADRE DE LA R&T

Chaque proposition d'action de R&T sera accompagnée du niveau de TRL visé à la fin de l'action. Le niveau visé devra être accompagné d'une ou deux phrases explicatives sur la démarche pour l'atteindre. Ces éléments seront discutés au sein du comité de pilotage.

A l'issue de l'action de R&T, le niveau TRL atteint fera parti des éléments de clôture.

Remarque : On ne cherchera pas à évaluer systématiquement toutes les actions (e.g: TRL non pertinents pour les actions de type « étude système »).

4.2 DANS LE CADRE DES PROJETS

Lors des revues de fin de phases préliminaire 0/A/B de nos projets, une liste d'équipements critiques sera présentée. Pour chaque équipement critique (techniquement et fonctionnellement) une évaluation TRL sera effectuée.

Voir exemple joint en annexe 2 (SIMBOL-X pour les technos de vol en formation).

4.3 POUR LES ROADMAPS

Lors de l'élaboration des roadmaps techniques, les passages des niveaux TRL seront identifiés. Lorsque nécessaire, les TRL seront également utilisés pour les roadmaps infrastructure.

REFERENCE :

TECHNOLOGY READINESS LEVELS

A White Paper

April 6, 1995

John C. Mankins

Advanced Concepts Office

Office of Space Access and Technology

NASA

ANNEXE 1 : DÉFINITIONS DE TERMES

Terme	Définition
Maquette	Ensemble de composants intégrés qui fournit une représentation d'un système, d'un sous système ou équipement et qui peut être utilisé pour déterminer la faisabilité d'un concept et obtenir des données techniques. Typiquement configuré pour une utilisation en laboratoire afin de démontrer les principes techniques d'intérêt immédiat. Peut n'être que fonctionnellement représentatif du système, sous système ou équipement final.
Faible représentativité	Représentation d'un composant ou d'un système qui a des possibilités limitées à la fourniture d'informations de premier ordre sur le produit final. Des évaluations de faible représentativité sont utilisées pour fournir des analyses de tendances.
Forte représentativité	Concerne la forme, les dimensions et les fonctions. Un environnement laboratoire de forte représentativité permet de réaliser des tests à l'aide d'équipements qui peuvent, grâce à des réglages, simuler et valider toutes les spécifications système.
Modèle d'ingénierie	Dossier de définition identique à celui du modèle de qualification mais composants de qualité non spatiale. Le dossier de fabrication reste dans une version préliminaire. Couvre les différents types de modèles MI (modèle d'identification), MSTH (modèle structural et thermique), ME (Modèle électrique).
Modèle de qualification	Dossier de définition et de fabrication identique à celui du modèle de vol. Le modèle de qualification sert à vérifier les marges de conception les dispersions de fabrication et les méconnaissances de l'environnement. Il ne peut pas voler en général car il a été « sur testé ».
Environnement représentatif	Environnement de test qui simule les aspects identifiés comme essentiels de l'environnement opérationnel.
Prototype	La première représentation du système qui offre les mêmes fonctionnalités et performances que celles attendues pour l'implémentation finale. Le prototype est suffisamment mature pour permettre la démonstration des possibilités techniques et opérationnelles requises pour le système final. Un prototype est également développé pour évaluer la faisabilité de production.

ANNEXE 2 : EXEMPLE D'UTILISATION PROJET (SIMBOL-X)

SIMBOL-X pour les technos de vol en formation

Un exercice préliminaire et non exhaustif a été effectué pour le projet SIMBOL-X, sur les technologies critiques pour le Vol en Formation. Les résultats sont présentés ci-dessous :

<i>Equipement</i>	<i>TRL actuel (2nd trimestre 2006)</i>	<i>Commentaires</i>	<i>TRL visé à la fin des activités identifiées au 2nd trimestre 2006 et date associée</i>	<i>Commentaires</i>
Métrologie RF	4	Maquettage laboratoire partiel, RDP fin avril 2006 - antennes : TRL9 - émetteur : TRL4 (faisabilité démontrée, techno validée dans un environnement de faible représentativité) - récepteur : TRL4 (basé sur récepteur GPS mais bande S et bi-fréquence, donc faisabilité démontrée et techno validée dans un environnement de faible représentativité car reste à faire transposition de fréquence)	7 visé en 2010	Démonstration en vol sur PRISMA
Senseur latéral	3	Concept identifié, faisabilité acquise par étude papier, pas de maquettage laboratoire à ce jour	4 visé en 2007	Activités R&T CNES en cours – spécification préliminaire et fonctions critiques validées par maquettage laboratoire
Senseur stellaire fin	3	Activité R&T CNES en cours - concept dérivé d'un senseur stellaire à APS (en cours de développement) faisabilité acquise par étude papier, pas de maquettage laboratoire à ce jour		
Propulsion hydrazine pour acquisition et contrôle orbite	6	Techno maîtrisée mais besoin d'une poussée de plusieurs heures validée uniquement au sol Remarque : sans ce besoin de poussée longue durée, cette techno aurait été évaluée au niveau 9		

Propulsion gaz froid impulsioonelle Option 1 (source UK)	8	Aptitude au vol du satellite CRYOSAT embarquant cette technologie Remarque : le niveau 9 n'a pas pu être atteint suite à l'échec de la mission		
Propulsion gaz froid impulsioonelle Option 2 (gaz froid liquéfié, stockage diphasique) Plus performante en masse	3	Concept identifié, faisabilité acquise par étude papier, pas de maquettage laboratoire à ce jour	6 en 2008	Démonstrateur sol envisagé, à proposer sur le plan R&T 2007
Propulsion gaz froid impulsioonelle Option 3 (source US)	9	Vole depuis 2002 sur les satellites GRACE du JPL		

Les autres fonctionnalités nécessitées par le Vol en Formation :

- transfert sur l'orbite HEO,
- déploiement et évitement des collisions,
- commande/contrôle (FDIR répartie, ...)
- ...

sont des fonctions de niveau système dont le niveau de maturité n'est pas traité par les TRL (cependant l'algorithmie correspondante pourra l'être).

ANNEXE 3 : EXEMPLE D'UTILISATION PROJET (VULCAIN-X)

Vulcain-X pour les technos de moteurs cryotechniques nouvelle génération

Un exercice préliminaire et non exhaustif a été effectué pour le projet Vulcain-X, sur les technologies critiques pour les moteurs cryotechniques de nouvelle génération. Les résultats sont présentés ci-dessous :

<i>Equipement</i>	<i>TRL actuel (2nd trimestre 2006)</i>	<i>Commentaires</i>	<i>TRL visé à la fin des activités identifiées au 2nd trimestre 2006 et date associée</i>	<i>Commentaires</i>
Combustion : injecteur tri-coaxe	TRL3	Essai élémentaire injecteur tri-coaxe au BUE, et modélisation du fonctionnement		
		Essai Mascotte ?		
		Essai GGP8		
		Développement d'un démonstrateur GGPX		
		Générateur de gaz nouvelle génération pour Vulcain-X		
Nouvelle conception Divergent	TRL2	Etudes Papier pour justifier performances en transitoire et stabilisée. Justification thermiques. Recherche du procédé de fabrication le plus adapté.	Avril 2006	
	TRL3	Fonctionnel : Démonstration expérimentale en similitude (échelle réduite gaz froid).	Avril 2007	
		Fabrication : mise au point des procédés de soudage, de contrôle non destructif, de mise en place de renfort par projection plasma (apport de matière par fil).	Janvier 2007	
	TRL4	Fabrication : réalisation d'un modèle échelle réduite pour validation des procédés de fabrication et contrôle. (engineering concourant).	Mars 2007	
	TRL5	Fabrication d'un prototype	Décembre 2007	
	TRL5	Fonctionnel : tests de validation des circuits de refroidissement au niveau hydraulique et validation des modèles. (essai réalisé en cours de fabrication du prototype)	Septembre 2007	
	TRL6	Essai à feu au banc au P5.(essai ARTA).	Juin 2008	