



Groupe ad hoc Base de données pour la fabrication additive

Point d'étape et perspectives

Animateur : P Lubineau (Cetim)

29 juin 2017

Contexte et enjeux

L'Initiative Fabrication Additive française portée par l'Alliance Industrie du Futur a trouvé sa première concrétisation dans la publication, le 24 novembre 2016, de sa feuille de route.

La fabrication additive est une technologie en plein essor, pour laquelle nous ne disposons pas encore comme pour les procédés traditionnels (élaboration métallurgique et mise en forme, usinage par exemple) du retour d'expérience suffisant pour prendre en compte la variabilité des procédés, des matières premières et des conceptions nouvelles (structures en treillis). Les cycles de qualification pouvant devoir se répéter complètement à chaque nouvelle configuration (pièce, machines, matériaux...).

Afin de favoriser le déploiement de la fabrication additive (raccourcissement des temps de développement, limitation du coût des essais ...), les industriels ont donc besoin d'une base de connaissances qualifiée (état de l'art) reconnue par tous, sur laquelle s'appuyer dans leur démarche de conception et de certification.

L'absence de coordination dans la génération de ces connaissances conduira inévitablement à la dispersion des efforts et des financements publics, chacun, fabricants, donneurs d'ordre, organismes certificateurs, académiques risquant d'avancer en ordre dispersé, refaisant les mêmes essais.

« Fédérer la constitution et l'exploitation de données techniques matériau-procédé-pièce indispensables au développement en production de pièces reproductibles et qualifiées. Cette base de données constitue un atout fort de visibilité et compétitivité pour la France sur le dialogue international entre fournisseurs et utilisateurs »¹

D'autres pays, les Etats-Unis notamment, ont lancé des initiatives conséquentes sur ce sujet. La France ne peut être absente de ces travaux, sous peine d'être réduite à utiliser des valeurs et des protocoles de caractérisation établis par d'autres sans concertation, qui s'imposeront à elle et qui n'ont aucune raison de favoriser les produits ou les technologies françaises.

Pour peser dans ces débats, la mise en place d'une coordination des initiatives d'établissement de bases de données aux plans national et international est un impératif. C'est un vecteur incontournable pour favoriser la diffusion à l'international des produits et technologies françaises.

La création d'une base de données matériaux partagée et mutualisée est donc une action majeure et prioritaire identifiée.

Il est apparu nécessaire à l'ensemble des acteurs de constituer une base de données matériaux mutualisée à destination des utilisateurs de la fabrication additive. Cette base de données aura pour ambition de recenser l'offre actuelle en matériaux, d'investiguer les procédés, les paramètres de fabrication et de post traitement, de compiler la typologie des défauts rencontrés.

Cette base de données matériaux devrait également déboucher sur la mise en place d'une bibliothèque des cas d'usage pour les rédacteurs de cahiers des charges intégrant à la fois les

¹ AIF- Initiative Fabrication Additive – Actions prioritaires no 3

règles de conception, les propriétés géométriques et mécaniques, le choix optimal des technologies.

Elle se place également dans la perspective de contribuer à établir des lois de comportement permettant d'alimenter les outils numériques, et donc de prédire les performances attendues des pièces dès la conception.

Le Groupe Ad Hoc – Base de données

Le groupe de travail ad hoc a réuni les membres de l'AIF ayant manifesté leur intérêt de participer à cette réflexion. Il a été constitué avec les personnes ayant répondu positivement à l'Appel à Manifestation d'Intérêt diffusé au mois de janvier auprès de l'ensemble de la communauté regroupée au sein de l'AIF (la liste est fournie en annexe A). Il comprend des industriels, des centres de R et D, des fournisseurs (de poudre, de machine, de logiciels,...).

Ses travaux se sont concentrés sur les données de caractérisations physiques des pièces obtenues. Bien évidemment la réflexion devra être plus vaste (typologie des défauts rencontrés,...) et coordonnée avec le recensement de l'offre actuelle en matériaux. Ces éléments avaient été identifiés et listés lors de travaux préparatoires et présentés à la plénière du 27/11/2016 (voir annexe B).

Le groupe s'est réuni à 3 reprises :

- La première fois pour confirmer l'intérêt des parties prenantes
- La seconde fois pour échanger sur les attendus de chacun, les données pouvant sous conditions être partagées, les données manquantes qui devraient être considérées en priorité.
- La troisième a consisté à un travail sous forme de 2 ateliers, l'un selon une perspective utilisateur et l'autre sous l'angle offre, avec en synthèse le rapprochement des 2 points de vue.

Eléments de synthèse

Des besoins différents : suivant les secteurs (outillage, aéronautique, luxe, bio médical, automobile, mécanique,...) et le positionnement sur la chaîne de valeur (Donneur d'ordres, Bureau d'études et de réalisation, ...) le type de données et les exigences associées en terme de traçabilité, « précision » peuvent être différents. Pour certains un ordre de grandeur est suffisant, pour d'autres la donnée doit être qualifiée et caractérisée statistiquement, les conditions de calibration de la machine définies et maîtrisées.

Le terme « données » recouvre également une grande diversité, du résultat brut d'un essai, ou d'un ensemble d'essais (de traction par exemple), à la définition d'une valeur « référence » issue du traitement statistique d'un grand nombre d'essais, voire, pour les académiques, à des enregistrements d'acquisition dynamique d'informations. Une première liste des attendus des parties prenantes a été établie (Annexe C). Une première définition du contenu « type » a été identifiée au sein du GT (voir annexe D). Ce dernier point s'est fait en liaison avec les travaux de formalisation d'un référentiel initiés au sein de la commission de normalisation UNM 920.

La valeur des données : posséder des données, ou tout du moins certaines données, représente également un avantage concurrentiel. Une donnée possède également une valeur économique intrinsèque (*a minima* son coût de production). Ces rappels faits, il en découle que :

- Certaines données n'auront donc jamais vocation à être mutualisées. Elles seront « propriétaires ».
- D'autres pourront l'être mais de façon restrictive.
- D'autres enfin pourront l'être très largement

Généralement une contrepartie à cette mise en commun sera demandée. Un premier embryon des modalités d'accès a été établi (voir annexe D).

On ne part pas de zéro :

- Il existe d'ores et déjà des bases de données disponibles (*nota* : le Cetim dans le cadre de ses propres actions collectives a lancé un benchmark dont il partagera les conclusions avec la communauté de l'AIF).
- Différents projets, notamment collaboratifs, ou des travaux académiques, ont permis la production de données dans des formats et des conditions différentes.
- D'autres projets sont actuellement en cours et incluent dans leurs livrables la production de nouvelles données.
- Tous les acteurs de la fabrication additive capitalisent, avec différents outils, des données afin de consolider leur expertise et la partager avec par ex. les autres acteurs de l'entreprise (BE, BM, etc.).

A l'issue de ce premier cycle de travaux, le groupe *ad hoc* confirme l'intérêt de constituer une base de données mutualisée matériaux pour la fabrication additive, pour au moins une partie des données nécessaires. L'objectif de la mutualisation est :

- **D'aller plus vite** : favoriser un véritable effet multiplicateur et accélérateur, dont tous les acteurs bénéficieront
- **D'éviter la dispersion des efforts** : risque de duplication de campagnes d'essais, optimisation des financements publics lorsque ces essais sont réalisés dans le cadre de projets bénéficiant de subventions, éviter la création *ex nihilo* de valeurs déjà existantes par ailleurs....
- **d'harmoniser un référentiel commun** : les propriétés physiques et les performances des pièces seront données en fonction des procédés utilisés, des paramètres de fabrication et de post traitement, des matériaux ... ;

Les déclinaisons sectorielles ou même individuelles pourront alors se restreindre aux seuls besoins spécifiques.

Perspectives

L'enjeu de la mutualisation tel qu'identifié par le GT est de faire plus vite et moins cher. Il ne s'agit pas de tout partager, ni de tout organiser dans une approche *Top Down*. D'autre part l'ambition affichée de fédérer la constitution et l'exploitation de données techniques, c'est-à-dire d'obtenir à terme une base de données mutualisée, structurée, qualifiée de référence qui réponde aux attentes

multiples des différentes parties prenantes (son contenu, les conditions d'accès, l'architecture, les conditions de propriétés...) suppose une approche et une construction dans la durée.

Les propositions du GT sont donc établies pour favoriser les synergies, les coopérations - sans freiner dans un souci de structuration, de formatage, - les initiatives et projets de production de données qui sont d'ores et déjà nombreuses, et qui répondent à leurs impératifs propres. En effet leurs initiateurs ont besoin des résultats prévus au-plus tôt et sans délais supplémentaires.

Le GT propose donc d'adopter une démarche agile et pragmatique visant à :

Favoriser au plus tôt la mutualisation d'essais lorsque cela est possible et souhaités par les acteurs concernés. Dans ce but il convient d'organiser la circulation d'information sur les campagnes d'essais à venir pour favoriser leur mutualisation. Toujours dans une logique d'agilité, ce dispositif reposera sur des outils simples et classiques disponibles. Ils pourront être étoffés au fur et à mesure des besoins.

Poursuivre l'identification des lots de données déjà existantes et partageables (avec leurs diversités en termes de caractéristiques, de format, et de modalités de mise à disposition associées). Cela permettra d'amorcer un premier fonds commun de données, certainement hétérogènes, dans un format de capitalisation temporaire.

En parallèle il propose

- de promouvoir une structure de données commune pour accueillir les contenus, basée sur les modèles normalisés dont le développement est en cours d'étude au sein de l'UNM 920, pour proposition au niveau ISO.
- D'instruire les modalités du processus de sélection des données qui seront éligibles à la base de données (niveau de traçabilité, format, « crédibilité »,...). En effet une procédure particulière doit être prévue pour qualifier les données référencées par la plateforme en termes de qualité ou de pertinence des données pour un usage particulier (intervalle de confiance sur les caractéristiques obtenues). Outre les données, il faudra également documenter les procédures d'obtention de ces caractéristiques, les procédures de calibration des machines. Pour les nouvelles données, le principe est d'appliquer les meilleures pratiques à convenir avec les acteurs, en particulier les grands utilisateurs, disponibles à la date de réalisation des campagnes d'essais. Ces pratiques sont à documenter et joindre aux résultats intégrés à la base.
- Le benchmark de l'offre Base de Données actuellement disponible sur le marché.
- De préparer « le cadre d'accueil et de partage » des données à venir, en approfondissant la spécification des besoins des différentes parties prenantes (DO pour la certification, concepteur, BER, ...) et donc d'en déduire les éléments de choix d'une future plateforme (infrastructure matériel et logiciel, service de personnalisation, maintenance, pérennité et évolutivité), de son modèle économique et de son portage.

En corollaire il pourra découler de ces actions des initiatives d'incitation à alimenter la structure proposée, des préconisations sur la production de nouvelles données et sur les nouvelles campagnes d'essais associées, ainsi que leur organisation.

Le GT souhaite continuer sa mission et élargir son audience pour rassembler largement la communauté de fournisseurs et d'utilisateurs de données.

Annexe A : membres du groupe de travail au 6/6/2017

Nom	Organisation
Daniel Lecuru	Airbus
Olivier Dubet	Airliquide
Erwan Coz	Bassetti
Isabelle Dam	Bureauveritas
Jean-Daniel Penot	Cea
Nicolas Bedouin	Cea
Alain-Jean Gauthier	Cea
Joel Rosenberg	DGA
Remi Giraud	Eramet-Erasteel
Michel Pierronnet	Eramet-Erasteel
Nicolas Delpont	Genesink
Victor Arnoux	Grantadesign
Matthieu Lafare	Inovsys
Didier Boisselier	Irepa-laser
Valerie Donal	IRT-Jules-Verne
Sakina Seghir	Materialia
Jerome Dubois	Mpsa
jean-luc Jacquot	Pfa-auto
Marc Benbahi	Plateforme technologique IDPro
Rochdi Merzouki	Polytech-Lille
Florent Buttin	Radiall
Konstantin Sipos	Rescoll
Sandy Blanc	Safrangroup
Thierry Vignes	Schneider Electric
Louis-Romain Joly	SnCF
Philippe Feraud	SnCF
Victor Chastand	Thalesgroup
Pascal Ghys	Alstom
Pierre Sallamand	U-Bourgogne
Pierre Alvarez	Zodiacaerospace
Philippe Mourgue	ESI



Groupe ad hoc Base de données matériaux pour la fabrication additive

Contexte

- Compte tenu qu'il s'agit d'un sujet transverse, commun à plusieurs GT, la réunion des pilotes de GT du 22/09 a créé un Groupe ad hoc

Groupe ad Hoc

- Jérôme Dubois (PSA GT 1)
- Dominique Ghiglione (Cetim GT 2)
- Hélène Determe (Cetim GT 3)
- Jean-Daniel Penot (CEA GT 4)
- Remi Giraud (Eramet Erasteel GT 6)
- Isabelle Dam (Bureau Veritas GT 7)
- Philippe Lubineau (Cetim pilote)

Synthèse des principaux verrous et besoins identifiés au travers des fiches actions des GT

- BdD de défauts rencontrés, sur la base d'un couple matériaux/procédés.
- BdD des relations Défauts / Nocivité
- Associer des gammes types de post-traitement à des performances sur des pièces.
- Volonté de création d'une communauté multi sectorielle pour mutualiser les données et leur diffusion.
- Données dépendant de la combinaison matériau, procédé, post-traitement
- Données de caractérisation mécaniques des pièces
- Données métallurgiques, de résistance à la corrosion
- Valeurs justifiées pour dimensionner des pièces, pour utiliser en BE et pour la certification
- Lois de comportement, pour avoir des outils prédictifs.
- Compilation des données existantes
- Définition de la méthodologie de capitalisation
- Référentiel commun pour les essais, et moyens d'essais.
- Création d'éprouvettes représentatives

Lignes directrices



- Besoin d'une base de données mutualisées à destination des utilisateurs de la fabrication additive (en particulier aux bureaux d'étude) sur les propriétés atteignables en fabrication additive (caractéristiques mécaniques, métallurgiques,...)
- Mise en perspective de cette base pour :
 - En déduire des lois de comportements
 - alimenter les outils numériques pour prédire les performances attendues des pièces dès la conception.
- Se coordonner avec les réflexions/actions sur:
 - les configurations ISO qui permettront de certifier les opérateurs et de qualifier les performances des machines.
 - La défauthèque.
 - Le recensement de l'offre actuelle en matériaux (fils, poudres,..) et les besoins à venir
- A investiguer le potentiel de traitement numérique/approches statistiques pour compléter certaines données,
- Pertinent de garder la coordination au sein du groupe ad hoc, en s'appuyant sur les travaux des GT.

Quelle méthodologie?

Deux grandes orientations:

- Compiler des données existantes
 - Difficultés de recenser et recueillir les données
 - Conditions de partage
 - Garantir l'unité de formalisme/traçabilité

- Réaliser des essais avec un environnement maîtrisé
 - Formalisme/traçabilité garantie
 - Maîtrise des résultats
 - Coûts/délais

Proposition de séquençement



1. Recensement des données mutualisables déjà disponibles ou en cours de de génération , sur la base d'une manifestation d'intérêt de leurs propriétaires



2. Travaux pour établir un référentiel en lien avec la normalisation, tenant compte des projets et/ou référentiels déjà existants



3. Périmètre à préciser, mais il y a déjà des réflexions d'engagée:



4. Montage du projet

1. Principes de l'architecture soft à utiliser



2. Modèle économique / PI



3. Programme d'essais à définir en fonction du retour des étapes 1,2,3



5. Lancement du projet



25/11/2016

Groupe Ad Hoc Base de Données – P Lubineau

5

Des données d'entrée

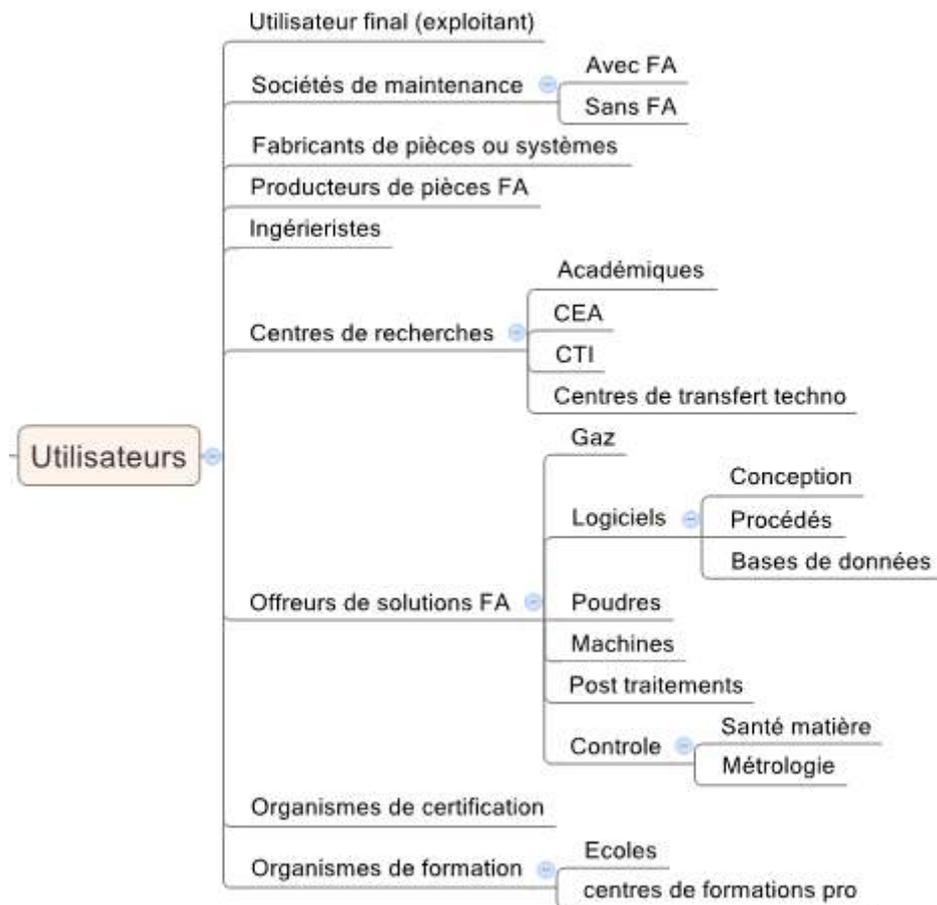
- **Définition du matériau primaire**
 - Chimie
 - Granulométrie
 - ...
- **Définition du procédés**
 - Type de procédé
 - Type de machines
 - Paramétrie utilisée
 - ...
- **Définition des post-traitements**
 - Thermiques
 - Mécaniques, chimiques
 - ...

Des données de sortie

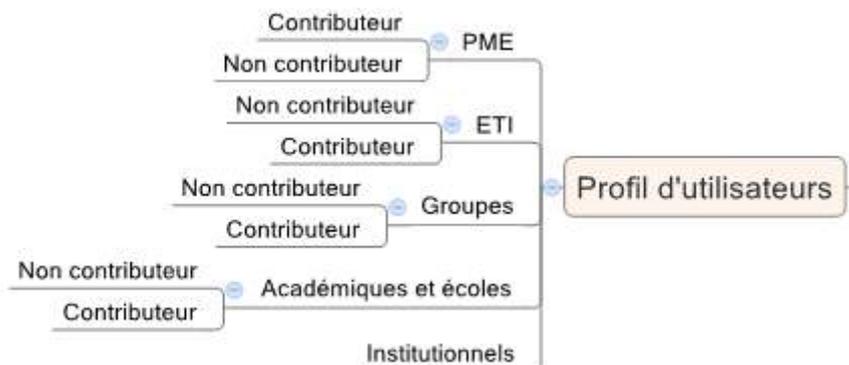
- **Caractéristiques mécaniques**
 - Propriétés statiques : R_e , R_m , $A\%$,...
 - Dynamiques : σ_D , courbe de Wöhler
 - Densité
- **Caractéristiques métallurgiques**
 - Microstructure, phases
 - Défauts maximum
- **Etat de surface**
 - Rugosité en fonction des orientations
 - ...
- **Autres**
 - Géométrie
 - Contraintes résiduelles
 - Tenue à la corrosion

Annexe C : Les parties prenantes et leurs attendus

Le GT a recensé les parties intéressées aux bases de données pour la fabrication additive



Pour chaque type de partie prenante, examiner si elle est potentiellement apporteuse de contenus pour une base de données partagée :



En fonction du type de partie prenante, quelles sont les informations attendues ?

Profil	Propriétés mécaniques (Tenue en fatigue, caractéristiques matériaux)	Propriétés Multi physique (thermiques, conductivité, mécaniques, etc.)	Caractérisation métallurgique (Santé matière, micro structure, contraintes résiduelles, défauts, Etat de surface)	Caractérisation dimensionnel	Aptitude à la réparation, traitements thermiques, surfaces, etc.	Traçabilité des données (Matériaux, protocoles d'essais, fichiers 3D, etc.)	Pré traitement statistique des données (liens entre propriétés mécaniques et propriétés métallurgiques)	Classifications substances (Reach, RoHS, etc.)	Données économiques	Notions HSE (FDS)	Importation simple de données	Post traitement (thermiques, surfaces, usinages, etc.)	Exportation simple des données	Formatage adapté des données
Utilisateur final (Exploitants)	X	X			X	X		X	X	X				
Sociétés de maintenance			X		X	X			X	X				
Fabricants de pièces ou de systèmes	X	X	X		X	X	X						X	
Producteurs de pièces en FA (role de conseil en +)	X	X	X			X				X	X		X	
Ingénieristes	X	X	X			X	X					X	X	
Centres de recherche	X	X	X			X	X				X	X	X	
Offreurs de solutions (Gaz)														
Offreurs de solutions (Logiciel)	X	X	X				X						X	X
Offreurs de solutions (Poudres)	X	X	X			X			X	X	X	X	X	
Offreurs de solutions (Machines)	X	X	X			X			X	X	X	X	X	
Offreurs de solutions (Post traitements)	X	X	X			X			X		X	X	X	
Offreurs de solutions (contrôle)	X	X	X	X										
Organismes de certifications	X	X	X	X		X				X			X	
Organismes de formation (Ecoles et Pros)	X	X	X			X			X	X		X	X	

Annexe D : contenu type

Quels sont les « Cas d'usage » (cibles)

- Simulation : préconception, fabrication, qualification – caractérisation -> données d'entrée
- Dimensionnement avec spécificités ALM
- Données suffisamment nombreuses pour exploitation statistique
- Normalisation
- Veille technologique

Des premiers contenus déjà proposés :

- TA6V, essais de traction et de fatigue, SLM
- AS7G0,6, essais de traction, SLM

Et des matériaux/procédés dont la caractérisation est attendue en priorité

Matériaux et/ou couple matériau-procédé

- Métalliques : TA6V, 316L, Al7G0,6, AlSi10Mg, Inconel 718, 17-4 PH, Maraging, CoCr
- Polymères
- Céramiques

Besoins :

Au moins les données qui sont dans les normes pour les procédés conventionnels et pour les matériaux suivants :

- AS7G0,6 et AlSi10Mg, : données de traction, dureté, fatigue, expansion thermique linéaire, conductivité thermique, conductivité électrique
- Ti-6Al-4V : données de traction
- 316L : données de traction, traction entre 100 et 550 °C, expansion thermique linéaire, conductivité thermique, capacité thermique massique, conductivité électrique

Données, formats et structures

Le périmètre de caractérisation des matériaux reste à préciser, en fonction des besoins, des priorités et moyens nécessaires.

Une première réflexion ouverte a ciblé les éléments suivants :

Données d'entrée

Matériau

Granulométrie

Morphologie

Composition chimique

Densité

Coulabilité

Fournisseur / Méthode d'élaboration / Numéro de lot

Données de recyclage poudre

Données de sécurité (inflammabilité, ...)

Fiches de sécurité

Données fils (compo chimique, diamètre, température fusion, ...)

Fabrication

Type de procédé

Machine

Numéro de série

Puissance laser

Longueur d'onde

Diamètre du spot au plan focal

Technique de mise en couche

Préchauffage

Logiciel de pilotage (version)

Nature du gaz / Taux d'oxygène résiduel

Paramétrie

Logiciel de préparation des stratégies de fabrication

Bulk, contour, lattice

Stratégie de fusion

Épaisseur de couche, puissance, vitesse, écart de vecteur, ...

Nature et dimension de la plaque support

Température de préchauffage

Géométrie des ébauches

Définition des supportages

Orientation des dépôts

Post-traitement

Données TTh (en lien entre autre avec les contraintes résiduelles)

Données Revêtements et TS

Usinage / finition / superfinition : état de surface (rugosité)

Traitement mécanique

Données de sortie (après fabrication, après post-traitement, après vieillissement)

• Physiques

Thermiques

Electriques

- Magnétiques
- Chimiques
 - Tenue à la corrosion et à l'oxydation à chaud
 - Pollution des poudres
 - Compositions chimiques localisées
- Mécaniques
 - Coefficient d'élasticité (Young, Poisson)
 - Limites d'élasticité, de rupture
 - Plasticité et viscoplasticité
 - Contraintes d'écoulement
 - À l'ambiante et en température
 - Tenue à la fatigue
 - Mécanique de la rupture
 - Dureté
 - Densité
 - Tenue au choc
 - Etat de surface
- Défauts
 - Porosités
 - Défauts détectés au contrôle
 - Nocivité de défaut
 - Causes du défaut (origines)
- Données de métallurgie
 - Atlas de microstructures
 - Taille de grains, phases, ...
 - Structure métallurgique
 - Texturation
- Diagrammes de transformation de phase (cinétiques de transformation)
 - TRC, TTT, ...
 - Relaxation
- Données topologiques
 - Orientation de construction
 - Sens de prélèvement
- Matériaux et/ou couple matériau-procédé
 - Métalliques : TA6V, 316L, Al7G0,6, Inconel 718, 17-4 PH, Maraging, Co-Cr
 - Polymères
 - Céramiques
- Source des données
 - Datasheets fournisseurs
 - Résultats d'essais standards / spécifiques
 - Résultats de calculs
 - Résultats de publications
- Nature des données
 - Valeurs / tolérances
 - Documentaire (procédures)
 - Courbes, tableaux, graphiques
 - Images

- Texte
- Liens entre les données

Traçabilité

- Fournisseur
- Laboratoire de caractérisation
- Références des machines
- Dates des données

Qualification des données

Une BDD collaborative ne permettra pas de constituer le dossier de qualification d'une pièce structurelle

Différents niveaux de BDD :

- BDD issue de bibliographie, des datasheets fournisseurs
- BDD dont le niveau de qualité des données est accessible et identifié (pour filtrage sur le niveau de qualité)
- Protection des données
- BDD de supportages

Etat de l'art, initiatives à l'international



Principes de protection des droits des parties prenantes, contreparties à la mise à disposition de contenu

