

LES PRINCIPALES EVOLUTIONS DE LA TECHNOLOGIE DES TUBES IIR VERS LA 5^{ème} GENERATION

par Gilbert Colomb

Le tube IIR peut se décrire comme un ensemble technologique composé principalement :

- a . d'une enceinte à vide ;
- b. d'une partie avant dite partie primaire ;
- c . d'une partie arrière opposée dite partie secondaire ;
- d . d'une partie interne , les électrodes ;
- e . d'une partie externe d'adaptation au système et à la table radiologique d'examen.

Les parties notées a b c d constituent le TUBE NU.

La partie notée e est l'HABILLAGE ou HOUSING.

Nous décrirons essentiellement tout ce qui se rapporte au tube nu, et aux avancées technologiques mises en œuvre relatives à la 5^{ème} Génération.

En fait la 5^{ème} Génération consolide la plupart des avancées et briques technologiques réalisées antérieurement et testées individuellement au cours du temps en fabrication.

Seules certaines, permettant de faire un gap important sur les performances et le coût, ont été développées et mises en œuvre dans le lancement cette nouvelle génération.

1.- ADAPTATION DES PERFORMANCES AU MARCHE :

S'adapter à l'environnement du marché mondial des tubes amplificateurs d'images radiologiques, en proposant :

- des produits performants et fiables,
- une rentabilité interne de l'activité industrielle conséquente.

Tels ont été les challenges quotidiens de l'histoire de Thales Electron Devices .

La Résolution, le Contraste, la Sensibilité, la Tenue en Haute Tension électrique, la Maîtrise des Défauts d'aspect et la Fiabilité ont été les principaux axes des travaux d'amélioration des performances et du coût de nos produits .

Les difficultés ont été nombreuses et complexes, les technologies à maîtriser faisant appel à des domaines aussi différents que :

- la physique du vide : vide limite, qualité, dégazage, getterisation,
- la physique des matériaux en couches minces,
- la maîtrise de la mise en forme de matériaux spécifiques divers :
Alliages métalliques, verre, céramiques, brasures.
et de leur état de surface,
- la chimie des traitements de surface et des traitements thermiques,
- la connaissance approfondie et exhaustive des phénomènes induits par l'utilisation de la très haute tension : isolement et émission électronique.

2.- LA 5^{ème} GENERATION DANS SES GRANDES LIGNES :

2.1 Les améliorations des performances optoélectroniques concernent principalement :

- Le contraste , la résolution en agissant sur l'écran primaire et l'écran secondaire .
- La sensibilité en agissant sur la photocathode , la sous couche et la qualité du vide résiduel,
- La distorsion en agissant sur la longueur de l'optique électronique, et la minimisation de la distance entre fenêtre d'entrée et l'ensemble écran primaire photocathode,
- Le QDE en augmentant la transmission aux rayons X de la fenêtre d'entrée , et l'efficacité de conversion du

scintillateur.

EN RESUME :

AMELIORATIONS TECHNOLOGIQUES

INCIDENCE SUR LES PERFORMANCES

ENROBAGE DES AIGUILLES CSI	→	CONTRASTE - RESOLUTION -
GLACE DE SORTIE RAPPORTEE	→	CONTRASTE - RESOLUTION
ECRAN SECONDAIRE COMPACTE PAR PRESSION	→	CONTRASTE - RESOLUTION
SOUS COUCHE OXYDE D'INDIUM	→	CONDUCTION PHOTOCATHODE AMELIOREE MEILLEURE TENUE EN PULSE (ABSENCE DE SATURATION)
PHOTOCATHODE SB K CS	→	AUGMENTATION DE LA SENSIBILITE STABILITE DANS LE TEMPS DE LA PHOTOCATHODE
FENETRE ENTREE ALUMINIUM	→	DISTORSION - QDE
ENCEINTE METAL	→	ASTIGMATISME - RESOLUTION - CONTRASTE

2.2 La réduction des coût a été dictée par :

- L'adoption de processus et de méthodologies plus industriels : emboutissage , kaban ,juste à temps,six sigma .
- La réduction de manière dragstique du verre et des assemblages verre métal par soufflage : On a généralisé le moulage .
- Un nouveau design de l'enceinte tout métal .
Des procédés par emboutissage plus capables ont remplacé les procédés par repoussage ou fluotournage à forte dispersion géométrique. Les enceintes et les électrodes plus précises en dimension, paralléline et concentricité ont permis de maîtriser considérablement la qualité de l'image finale : résolution ,astigmatisme .
- L'acquisition de nouvelles compétences :
 - brasage aluminium / acier inoxydable (fenêtre entrée)
 - brasage cuivre / inox (queusots)
 - Soudage laser / soudure TIG : passages verre métal fragiles .
- Une maîtrise des flux plus rigoureuse : Juste à temps – Kanban .
- Une généralisation de la formation terrain : modules JLB .
- Un système qualité plus structuré et plus efficace.
- Une maîtrise des procédés systématique : Six sigma avec GE – Plans d'expérience – cartes des contrôle.

2.3 L'accroissement significatif de nos connaissances a été le résultat d'une volonté de l'entreprise de s'ouvrir vers l'extérieur en pratiquant :

- Le benchmarking systématique
- La participation aux réseaux techniques thales (vide ,matériaux ,traitements de surface)
- La participation aux projets européen : automatisation de la soudure tig par pilotage du procédé à partir de la vision du bain de soudure, projet mené avec le CEA et plusieurs participants européens .
- L'analyse de la concurrence (brevets , produits , publications)
- La participation d'intervenants extérieurs .

3.- PERFORMANCES OPTOELECTRONIQUES / TECHNOLOGIES MISES EN ŒUVRE :

3.1 PARTIE PRIMAIRE : ECRAN PRIMAIRE - SOUS COUCHE – PHOTOCATHODE :

La partie primaire et l'écran secondaire sont au cœur du dispositif physico chimique de conversion des rayons X en électrons pour le premier et d'électrons en lumière visible pour le deuxième .

L'ECRAN PRIMAIRE

- Le SUPPORT est de l'aluminium. Sa forme est une calotte au profil parabolique réalisée par hydro formage et compatible avec la géométrie de l'optique électronique .

Le choix du matériau et ses traitements, sont déterminants pour la qualité de l'image finale (lignage, mosaiquage, bruit quantique...)

- Le SCINTILLATEUR est de l'Iodure de Césium dopé au sodium ou au thallium .

Son épaisseur est de l'ordre de 400 microns .

Son rôle est de convertir l'image de rayons X en photons lumineux (bleus) qui iront exciter la photocathode et qui à son tour les convertira en électrons .

Le scintillateur est réalisé par évaporation sous vide . Les conditions thermiques sont majeures sur sa structure .

Une des propriétés de cette évaporation est de faire croître cette couche en fines aiguilles qui vont se comporter comme des conduits de lumière . Elles vont éviter toute diffusion latérale de la lumière qui se traduirait par une dégradation du contraste et de la résolution.

Un des enjeux est donc de conserver cette structure .

Très sensible à la coalescence en hygrométrie non contrôlée, et pour lutter contre cette dégradation, les aiguilles sont enrobées par un produit qui jouera ce rôle : l'utilisation du tétra acétate de silicium a été développée dans ce but.

- La sous couche d'Oxyde d'Indium est ensuite déposée par évaporation " pseudo- sputtering".

Elle joue un rôle de couche barrière physico chimique et de conduction entre le scintillateur et la photocathode. Son épaisseur est de l'ordre de 100 amstrongs..

- La PHOTOCATHODE de type SbKCs ou S11+ vient clore la réalisation de l'ensemble.

Elle est réalisée , tube assemblé sur un bati de pompage sous vide , dans des conditions thermiques définies. Ses constituants Alcalins,et Antimoine, sont évaporés à partir de nacelles internes, chauffées par résistance. La conduite du processus de formation qui consiste à réaliser des couches alternées de Cesium, de Potassium et d'Antimoine se fait en fonction de l'évolution du niveau de sensibilité retour de la photocathode en formation.

L'épaisseur de la couche est de l'ordre d'une centaine d'amstrong.

Ainsi est réalisée la photocathode . Cette opération est nommée Activation.

3.2 FENETRE D'ENTREE :

Historique : - à l'origine verre de 4 à 5 mm d'épaisseur -

sa forme convexe suit celle de l'EP.

- puis Inox de 1/10 mm - plan tendu – soudure TIG .

sa forme tendue pseudo plane est très différente de celle de

l'ensemble Ecran Primaire donc très défavorable pour l'encombrement du tube.

- et ensuite Aluminium AG4 MC – Techno toshiba

dôme Aluminium assemblé à la partie Inox par Thermocompression.

sa forme suit celle de la partie EP.

Objectif du projet 5G:

- fenêtre aluminium avec jonction à l'enceinte en inox

- ne plus utiliser les brevets concurrents, être en parfaite autonomie de technologie .

- réduire les coût
- accroître la fiabilité .

Technos explorées :

- | | |
|---------------------------------------|------------------------------------|
| • Brasage Alu/inox .(Saphymostel) | protos OK sur tous les diamètres |
| • Magnéto formage (barras provence) | protos OK sur petits diamètres 6'' |
| • Incrustation(CEA) | non étanche à 10-8 |
| • Friction(pme lyon). | Non testée |

→ Techno retenue : brasage Alu / inox . (techno Saphymostel)

REMARQUE :

Seuls l'aluminium pur et l'acier inoxydable se brasent à la brasure eutectique aluminium - Silicium. Or pour des raisons purement de tenue mécanique, nos dômes qui constituent notre FE sont en alliage AG4MC.

Nous avons donc été contraints de braser alu pur et inox, pour ensuite souder en tig , la jonction alu pur et la fenêtre en AG4MC.

Cette opération est très critique . Elle nous a demandé beaucoup de mise au point, surtout en ce qui concerne le protocole à suivre en terme de traitement chimique des pièces à assembler et les paramètres de soudage. Les ateliers mécanique et traitements de surface ont été très actifs et performants dans la mise au point de ce processus.

Globalement cette techno est très industrielle.

Pour le brasage, on utilise une machine standard haute fréquence standard, destinée à braser industriellement les fonds de casserole .

Pour l'anecdote :

Le matériau ferromagnétique utilisé dans le procédé de chauffage possède un point de curie qui correspond à la température de brasage. La régulation se fait ainsi naturellement.

Cependant, pour s'adapter à nos besoins, des usinages précis et reproductibles au tour à commande numérique, sont nécessaires . Ils nous permettent de nous affranchir des résidus de flux de brasage et de nous adapter avec précision aux opérations de constitution de notre enceinte finale.

La fiabilité accrue de cette opération par rapport à la thermocompression nous conduit à une réduction du coût notable.

Un brevet international a pu être déposé .

Il a été primé par la direction de Thalès en 2000.

Nous soulignerons le travail collectif de tous les services (mécanique, développement IIR prototypes, traitements de surface , photocathode ,verrière ,écrans ...) , qui ont ainsi su travailler ensembles avec compétence , ouverture et efficacité.

3.3 FENETRE DE SORTIE ET ECRAN SECONDAIRE

Pour augmenter le contraste en évitant les réflexions parasites liées au passage de la lumière entre la glace de l'écran secondaire et la glace de sortie de la verrerie , nous avons adopté la solution de fusionner les deux glaces ,et d'adopter la solution de la glace de sortie rapportée utilisée par la plupart de nos concurrents.

Un design avait été évalué en parallèle mais rapidement abandonné car trop risqué au niveau des blemishes engendrées par sa mise en œuvre .Il consistait à coller en interne au puits de la verrerie, l'écran secondaire déposé sur son support , comblant ainsi l'espace entre les deux glaces par de la colle d'indice , évitant ainsi les réflexions de lumière parasite .

Le nouveau design retenu impliquait un potting externe,pour maîtriser la haute tension, une

opération jugée dès le début, complexe et à risque .

Cependant les performances de cette technologies étaient réelles .

En pratique les problèmes de tenue haute tension que nous avons imaginés, se sont vérifiés .

Nous avons collectivement sous évalué la criticité de ce procédé . Sa mise en œuvre n'était pas dans notre savoir faire quotidien et les délais de développement ne nous permettait pas de nous y faire une expérience industrielle.

Le processus d'isolement externe de quelques dizaines de kilovolts, et la maîtrise des courants de fuite de conduction associés, ont été difficiles à maîtriser et à l'origine de problèmes de fiabilité, et d'arcing en atmosphère humide.

Le procédé était hypercritique et les conditions d'utilisation l'étaient aussi. La définition globale des paramètres a été faite avec des marges et une expérience insuffisantes : les distances d'isolement étaient trop justes, et les matériaux insuffisamment isolants. De plus , les préparations des surfaces et l'utilisation de primaire nécessaire à la parfaite adhérence de la résine pour éviter les conductions externes rendaient le procédé très exigeant dans sa mise en oeuvre.

GLACE RAPPORTEE

On assemble par moulage un collet métallique en Dilver et un pavé de verre optique.

On le polit ensuite optiquement pour y déposer une couche de materiau cathodoluminescente qui constitua l'écran secondaire.

Le sous ensemble ainsi constitué sera soudé en TIG sur le pied en fin d'assemblage.

Il s'agit là d'une technologie novatrice source de performances électro optiques accrues et de réduction des couts importante. Nous n'avons pas rencontré de difficultés majeures dans sa mise au point , et dans son industrialisation. Nous en avons la maîtrise par les technos mises en œuvre et par l'expérience acquise au fil du temps.

3.4 ENCEINTE ET ELECTRODES :

L'enceinte et les différents collets sont réalisés par emboutissage .

Ils seront usinés , subiront traitements chimiques et thermiques pour adapter leur assemblage aux autres sous ensembles . (pied verre ,fenêtre d'entrée , glace rapportée , queusot inox cuivre, passages verre métal) .

Pour s'affranchir des reflections lumineuses , pièces d'enceinte et électrodes sont soit sablées, soit oxydées pour les rendre antirefléchissantes.

PLUS GENERALEMENT NOUS UTILISONS SYSTEMATIQUEMENT:

- la soudure HF pour les assemblages verre / métal ,
- la soudure TIG pour les assemblages métal / métal ,
- la soudure Laser pour les assemblages verre / métal fragiles ,

On évite les dysfonctionnements du tube vis-à-vis des problèmes haute tension en utilisant de l'Oxyde de Chrome en recouvrant les zones à risque d'émission , de lueurs ou de claquage .

C'est un produit miracle dans le traitement des problèmes en tht qui a la propriété :

- de pouvoir réguler les courant de fuite et d'éviter les claquages dus à une mauvaise tenue en tension, liés à des accumulations de charge provoquées par des céramiques entre électrodes trop isolantes .
- d'inhiber les zones photoémitrices parasites liées à la formation de la photocathode.

AUTRES REMARQUES :

- les soudures TIG sont d'autant plus critiques que les pièces sont oxydées.
 - on évite la montée en température des pièces à assembler en TIG en pressant les pièces et en utilisant des refroidisseurs en cuivre .
 - les oxydes métalliques sont des poisons, ils génèrent des petites particules qui peuvent provoquer des défauts d'aspect de l'image.
- Lors des soudures ils perturbent le bain et peuvent engendrer des cavites à l'origine d'une mauvaise étanchéité des cordons de soudure.

3.5 HABILLAGE -POTTING - PLATEAU GUIDE

SIMPLIFICATION DE L'HABILLAGE ET DU POTTING :

--> - PLATEAU GUIDE

- POTTING

- COUPELLE ALU AJOUREE ET NOIRCIE PAR ANODISATION

.....à TERMINER

4.- LES COULISSES DU DEVELOPPEMENT :

4.1 Génèse de la photocathode de type S11 et des sous couches IN2O3

Tout débute sur une info recueillie par le directeur technique au retour d'un de ses voyages aux US . Cette info est immédiatement exploitée.

Le Test est réalisé par l'équipe protos développement IIR

Sur un bati évaporation sous vide du secteur on réalise :

- une évaporation joule d'Indium que l'on recuit en atmosphère oxydante
- une évaporation réactive sous O2 in2o3 joule + recuit D'oxydation ou évap réactive.
- une photocathode S20 ,NaSb2KCs . le standard de l'époque est réalisée
- le résultat en :sensibilité est décevant: I pc faible ,correspondant à ½ du standard.

En fait les 2 couches pseudo In2 O3 et photocathode S20 sont incompatibles.

La décision est donc prise de réaliser une photocathode S11 ou SBCs.

Les résultats sont alors encourageants et apres des essais en rajoutant du Potassium nous arrivons avec la Pc SBKCS à des résultats acceptables.

Le process est désormais plus simple , puis rapide, plus facilement automatisable.

L'ensemble présente une conduction améliorée, nous affranchissant des pbs de saturation en impulsion, cause de non conformite importante des couches précédentes (20 % de non conformité) avec les s :c barrières alumine ou P2O5.

Pour mémoire le procédé précédent comportait plusieurs dizaines de couches .On épaississait la PC avec de très nbres couches de Sodium pour tenter de rendre l'ensemble plus conducteur. Cela durait plusieurs heures et l'opération très manuelle exigeait un opérateur qualifié et beaucoup de MO.

Les rendements ont été améliorés et le temps MO très réduit .

4.2 Conclusion à en tirer en terme de management :

Avec des équipes autonomes,

un management flexible ,

un formalisme intelligent et efficace

des moyens indépendants en MO et en équipements ,

tout en étant très proche de la fab pour des essais de reproductibilité,

on peut faire avancer les choses très rapidement et ce , malgré les tâtonnements et les erreurs inhérents au travail de développement.

Nos responsables avaient cette vision globale et long terme .

Les effectifs et les équipements étaient à la hauteur.

Nous pouvions donc être professionnel et performant.

Prenons l' exemple l'Atelier de montage et de mécanique des prototypes du développement IIR dont les moyens étaient les suivants :

- 3 opérateurs dont 2 mécaniciens qualifiés, pour le montage des prototypes et la réalisation des pièces,

- un groupe de pompage Ultra Vide d'activation avec automate et 1 technicien pour le servir
- un groupe d'évaporation sous vide de très grand volume en vide propre :
groupe de pompage cryogénique équipé d'un canon à électron pour les matériaux réfractaires
- 2 batis d'évaporation classiques ,1 technicien
- un microscope électronique à balayage pour les caractérisations.

Cette autonomie et cette flexibilité étaient donc propices à la réactivité, à la compétence, à l'ambiance de travail, au travail en équipe, et à la créativité.

La qualité du matériel et celle des intervenants étaient dictés par la performance, le professionnalisme pour préserver notre place sur le marché mondial.

C'est vrai qu'il existait un doute sur la qualité de notre vide obtenu avec les pompes à diffusion d'huile . La présence d'hydrocarbures résiduels et la présence d'un vide insuffisant , vis de nos photocathodes, étaient un risque pour leur performance intrinsèque en sensibilité et sur la dégradation précoce de celle ci dans le temps et en clientèle.

Cela explique la mise en place de moyens de pompage performants dits "propres ", de type pompes cryogéniques, pompes turbomoléculaires, canalisations inox , joints cuivre, et étuvage poussé permettant un parfait dégazage. A cela s'ajoutait l'environnement , avec une activité IIL 5G AsGa , ou l'ultra vide était de mise . Cette culture semi conducteur et ultra vide s'était fortement développée dans l'entreprise et aussi avec une moindre exigence au sein de l'activité tubes .

5.- ADAPTATION DE L'ORGANISATION , DES METHODOLOGIES , DE LA CULTURE D'ENTREPRISE :

Les procédés sont définies de manière exhaustive et précise par l'établissement de :

- PROCEDURES
- DIAGRAMMES DE CHEMINEMENT

Une maîtrise des flux rigoureuse alliant organisation et informatique est mise en place :

- MAITRISE DES FLUX - JUSTE A TEMPS - KAMBAN
- SYSTEME DE GESTION INTEGRE ERP - SAP info - gestion de production

Notre système qualité est restructuré :

- CERTIFICATION ISO DE NOTRE SYSTEME DOCUMENTAIRE
- PROCEDURES QUALITES
- AUDITS QUALITE
- ANIMATEURS QUALITES

Notre organisation est révisée en profondeur dans le sens de l'autonomie , de la responsabilisation, de la diminution des niveaux hiérarchiques :

- EQUIPES AUTONOMES
- RESPONSABLES UNITES DE PRODUCTION
- SUPPORTS TECHNIQUES
- ANIMATEURS QUALITES

Le travail en projet et l'organisation matricielle sont désormais la règle ,

- CHEF DE PROJET - RESPONSABLES DE LOT

Une nouvelle culture d'entreprise a été inculquée :

- AUTONOMIE - RESPONSABILISATION - RIGUEUR
- RESPECT DES REGLES ET DES CONTRATS ETABLIES
- REGULATION - CHARTES

La formation est au coeur du dispositif d'évolution et de progrès :

- FORMATION ET AIDES PEDAGOGIQUES FILMS X
- OUTILS D'APPRENTISSAGE ET D'EVALUATION X
- JOURNAL HEBDOMADAIRE D'INFORMATION X

ANNEXE :

POUR MEMOIRE : QUELQUES ACTEURS / LEUR TERRAIN DE CONTRIBUTION :

MANAGEMENT	DRIARD - ROUGEOT - M.MOYNE
PHYSIQUE GENERALISTE	M .VERAT - J.RICODEAU - ROSIERE
ECRANS - PHOTOCATHODES	Y.RAVERDY - PL.TROTTA - GALVEZ - GUTIERREZ - GIBIDINI - MERLOZ - C.TASSIN G.VIEUX - D.GALLY - MERLOZ - F.CHAREYRE - .AURIA - A. REYNERI - G.CASALI - G.GUILHEM - D.DELATTRE - JM.MACHEREL - D.BOISSON .
TECHNO TUBES	G.COLOMB - CREUSOT - ROMAGNA GERMAIN- A. BONACHE - BONNEFOY - MAHNANE - MACAUCA - LAFRANCESQUINA - FOURMANEGLIA - A. TRANCHANT -
HOUSING POTTING THT	P.JOLY - S. COZZI - VAISSIERES - GLOWAKY
CHIMIE ET TT	SAVORNIN - A. MUNARI
VERRERIE	MEIGNIN - MAGNANI - LEHEUP
MECANIQUE	BOUILLAT - R.GUINET - TEPPAZ - POYET
MESURES	JM.DEON - FESSOU - BARJOT

ET PLUS
