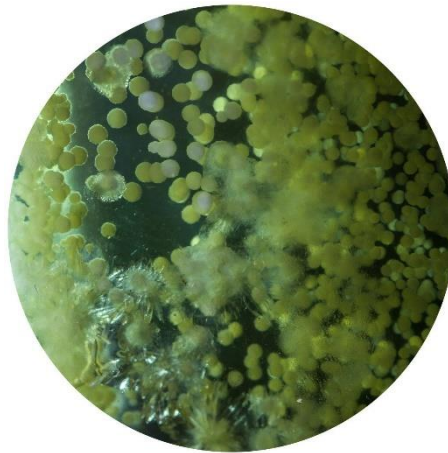


Etude de dégradations particulières sur deux
écrans cathodiques, un digital VT220 et digital
VR201 conservés au Musée Bolo, EPFL
Collection Yves Bolognini



Travail de Mémoire présenté par

Nydegger Noémie

Pour l'obtention du

Bachelor of Arts HES-SO en Conservation

Objets scientifiques, techniques et horlogers

Année académique : 2018-2019

Remise du travail : 15.07.2019

Jury : 27.08.2019

Nombre de pages : 141

Annexes incluses

Version corrigée, du 15.10.2019

Engagement

« J'atteste que ce travail est le résultat de ma propre création et qu'il n'a été présenté à aucun autre jury que ce soit en partie ou entièrement. J'atteste également que dans ce texte toute affirmation qui n'est pas le fruit de ma réflexion personnelle est attribuée à sa source et que tout passage recopié d'une autre source est en outre placé entre guillemets. »

Date et signature :

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont permis de réaliser mon travail de Bachelor.

Cédric Gaudin, Président de l'association des amis du musée Bolo et responsable de stage ainsi que tous les autres membres qui m'ont aidé et soutenu pour la réalisation des tâches pratiques, des photographies et la rédaction du dossier : **Romain Borgeaud**, **Daniela Perren**, **Robin François** et **Varen Casoli**.

Yves Bolognini, fondateur du musée Bolo qui m'a permis d'effectuer ce travail de mémoire sur une partie de sa collection.

Les membres du Jury : **Regis Bertholon**, conservateur-restaurateur et responsable de filière, **Valentin Boissonnas**, conservateur-restaurateur, **Thierry Jacot**, spécialiste en conservation préventive, et **Tobias Schenkel**, conservateur-restaurateur qui était aussi mon enseignant référent, pour leur disponibilité et conseils pendant la phase préparatoire et les huit semaines passées à étudier mon sujet de diplôme.

Sylvie Ramel, consultante en conservation préventive et conservatrice-restauratrice spécialisée en matériaux modernes et matériaux plastiques qui m'a donné le courage de me lancer dans cette étude.

Marc Egger, enseignant spécialisation matériaux et médias modernes à la Haute école des arts de Berne pour ses conseils lors de la phase préparatoire et la fin du travail de mémoire.

Edith Joseph, membre de l'équipe de recherche à la HE-Arc pour son aide lors de la réalisation et l'interprétation des analyses FTIR.

Alexis Domjan, professeur de chimie à la HE-Arc pour ses avis et conseils concernant l'altération étudiée et pour certains tests.

Hortense de Corneillan, conservatrice-restauratrice et chargée de cours à la HE-Arc pour son avis et ses conseils.

Yvonne Shashoua, responsable scientifique au musée national du Danemark et spécialiste en archéologie environnementale et science des matériaux pour son avis sur l'altération étudiée.

Alexandra Lefebvre et **Amir Zand** qui m'ont aidée et soutenue pendant la phase préparatoire et la rédaction.

Kevin Wieniukiewicz pour m'avoir supporté et soutenue tout le long de la préparation et la rédaction du travail de mémoire.

Mon père **Marc Nydegger** pour m'avoir soutenue et s'être chargé de la traduction du résumé en allemand.

Table des matières

Résumé	5
Zusammenfassung	6
Abstract	7
Introduction	8
Partie I	9
Présentation des écrans cathodiques	9
1. Les écrans cathodiques	10
1.1. Historique général et fonctionnement des écrans cathodiques	10
1.2. Ecrans cathodiques : critères de sélection et objectifs	12
1.3. Valeurs culturelles des objets	13
1.4. Fiche d'identité du terminal VT220	14
1.5. Fiche d'identité de l'écran VR201	15
2. Technologie de fabrication des écrans cathodiques	16
2.1. L'ampoule de verre	16
2.2. Le tube cathodique	16
2.3. L'écran de protection anti-implosion	17
3. Description des objets	18
3.1. Description du terminal VT220	18
3.2. Description de l'écran VR201	19
3.3. Matériaux constitutifs des écrans cathodiques	19
Partie II	20
Constat d'état et caractérisation des polymères	20
4. Constat d'état : Observation visuelle de l'altération	21
4.1. Constats d'état de l'écran du terminal VT220	21
4.2. Constat d'état de l'écran VR201	23
4.3. Observation de la bande adhésive entourant l'écran de protection	26
4.4. Stratigraphie de l'adhésif altéré	26
5. Caractérisation des polymères et des adhésifs	27
5.1. Les polymères	27
5.2. Les adhésifs	29
5.3. L'adhésif de polyuréthane	30
5.4. Les adjuvants des colles synthétiques	31
Partie III	32
Hypothèses de dégradation	32
6. Analyses, tests et hypothèses de dégradation	33
6.1. Les dégradations des polymères et focus sur le polyuréthane	33
6.1.1. La dégradation thermique	33
6.1.2. La photodégradation	34
6.1.3. L'hydrolyse et tests de mesure de l'acidité	35

6.2. Les dégradations liées aux polluants atmosphériques	36
6.2.1. L'oxygène	36
6.2.2. Le dioxyde d'azote	37
6.3. Analyses FTIR-ATR : Ecran VR201	37
6.3.1. Comparaison du spectre de l'adhésif à un polyuréthane	40
6.3.2. Comparaison du spectre des zones altérées	41
6.4. Les micro-organismes	42
6.4.1. Tests de bioluminescence	42
6.4.2. Analyses FTIR-ATR pour détecter la présence de micro-organismes	42
6.4.3. Essais de mise en culture au Laboratoire de Microbiologie de l'Université de Neuchâtel	43
6.5. Dissolution d'un échantillon de colle avec des zones altérées	44
6.6. Le soufre : tests de détection	45
6.7. La migration d'adjuvants	45
6.7.1. Les retardateurs de flammes halogénés et le test de Beilstein	47
6.7.2. Les plastifiants	48
7. Synthèse des résultats	49
Partie IV	51
Préconisations de conservation	51
8. Préconisations de conservation	52
8.1. Les conditions de conservation	52
8.2. Le stockage et la manipulation	53
Conclusion	54
Références et listes d'illustrations	55
Bibliographie	55
Liste des spectres	66
Liste des tableaux	66
Liste des figures et crédits photographiques	67
Annexes	73
Glossaire	74
Contacts	79
Annexe 1 Précisions sur les écrans cathodiques	81
Différences de fonctionnement entre le terminal VT220 et l'écran VR201	81
En atelier : les précautions à prendre avec des objets électroniques	81
D'autres polymères dans l'électronique	82
Annexe 2 Protocoles de démontage et de remontage	83
Démontage et remontage du terminal VT220	83
Démontage et remontage de l'écran VR201	94
Annexe 3 Détails de certaines hypothèses	98
Détails de la dégradation thermique	98
Détails de la photodégradation	98
Paramètres à prendre en compte lors de la fabrication d'un adhésif	99
Les antioxydants	99
Les charges dans les adhésifs de polyuréthane	100
Annexe 4 Tests et marche à suivre	101

Tests de mesure de l'acidité Marche à suivre et résultats	101
Tests de bioluminescence Marche à suivre et résultats.....	103
Choix du solvant organique pour une dissolution	105
Tests de détection du soufre Marche à suivre et résultats	107
Test de Beilstein : détection de produits halogénés Marche à suivre et résultats	109
Annexe 5 Analyses FTIR et essais de mise en culture.....	111
Techniques d'analyse des polymères	111
Annexe 6 Photographies et images	115
Annexe 7 Synthèse des hypothèses de dégradation.....	137

Résumé

Le Musée Bolo compte parmi ses collections plusieurs milliers d'ordinateurs, logiciels informatiques, accessoires, périphériques mais également des journaux, magazines, livres et tutoriels. Ces objets ont été collectés depuis plus de vingt ans par le fondateur du musée, Yves Bolognini.

Parmi ces objets, certains écrans présentent une altération étrange que l'on nomme *cataracte* des écrans cathodiques. Deux modèles atteints, le terminal VT220 et l'écran VR201 ont été étudiés. D'étranges taches opaques sont visibles dans l'adhésif qui maintient l'écran de protection anti-implosion. Ce travail de mémoire a permis d'en savoir plus sur cette dégradation qui est fréquente au sein de beaucoup de musées dans le monde. A première vue, cela fait penser à une biodégradation, fongique ou bactérienne.

Plusieurs tests et analyses ont été effectués afin de déterminer la cause de cette dégradation. Les analyses FTIR (spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier), notamment, n'attestent pas la présence de micro-organismes et nous ont dirigés plutôt vers une dégradation intrinsèque propre à l'adhésif.

Les résultats des tests et observations sont présentés dans ce mémoire de Bachelor, soutenant l'hypothèse d'une migration de composés de dégradation et d'additifs, dont le plastifiant. Cette dégradation serait accélérée par de mauvaises conditions de conservation et une exposition à l'air ambiant.

Zusammenfassung

Das Bolo Museum besitzt unter seinen Sammlungen viele Tausende von Computern, Software, Zubehör, Peripherien, sondern auch Zeitungen, Zeitschriften, Bücher und Tutorials. Diese Objekte wurden vom Gründer des Museums, Yves Bolognini seit mehr als zwanzig Jahren gesammelt.

Einige Bildschirme dieser Sammlung haben eine seltsame Veränderung, die man *Katarakt* CRTs nennt (Cathode ray tube). Zwei Model wurden untersucht, der VT220 Terminal und der Bildschirm VR201. Seltsame undurchsichtige Leck sind im Klebstoff, der die Aufrechterhaltung des Implosion Schutzgitter ermöglicht sichtbar. Diese Untersuchung Arbeit erlaubt, mehr über diese Verschlechterung zu erfahren, die in vielen Museen der Welt üblich ist. Auf den ersten Blick kann man an Pilz- oder bakterielle Aufbau denken.

Einige Tests und Analysen wurden durchgeführt, um die Ursache dieser Verschlechterung zu ermitteln. IR -TF Analyse (Infrarot-Spektroskopie, Fourier-Transformation), bezeugen keine Anwesenheit von Mikroorganismen und führte uns in Richtung einer intrinsischen Verschlechterung des Klebstoffes

Die Ergebnisse der Tests und Beobachtungen unterstützen in diesem Bachelor Auftrag die Hypothese einer Migration von Zusatzstoffen, darunter auch ins besonders der Weichmacher. Dieser Abbau wird durch schlechte konservatorische Bedingungen und der Exposition gegenüber Umgebungsluft beschleunigt.

Abstract

The Musée Bolo collections include several thousand computers, softwares, accessories, peripherals but also newspapers, magazines, books and tutorials. These objects have been collected for more than twenty years by the museum's founder, Yves Bolognini.

Among these objects, some screens display a strange alteration called the *cataract* of cathode-ray screens. Two affected models, the VT220 terminal and the VR201 screen have been studied. Strange opaque spots are visible in the adhesive that holds the implosion protection panel. This thesis has allowed us to learn more about this degradation, which is frequent in many museums around the world. At first glance, this suggests a fungal or bacterial biodegradation.

Several tests and analyses have been carried out to determine the cause of this degradation. FTIR (Fourier Transform InfraRed spectroscopy) analyses, in particular, do not attest the presence of microorganisms and have concluded to an intrinsic degradation specific to the adhesive.

The results of the tests and observations are presented in this bachelor's thesis, supporting the hypothesis of a migration of degradation compounds and additives, including the plasticizer. This degradation would be accelerated by poor storage conditions and exposure to ambient air.

Introduction

Le patrimoine technique et plus spécifiquement le patrimoine informatique n'est que peu étudié en termes de conservation et restauration. Plusieurs écrans cathodiques conservés au Musée Bolo ainsi que d'autres institutions patrimoniales présentent une altération formant des taches sur les écrans qui est nommée *cataracte* dans le milieu informatique.

L'étude de cette dégradation qui se situe au niveau de l'adhésif de l'écran de protection anti-implosion est nécessaire pour préconiser les bonnes conditions de conservation. En effet, cela semble à première vue, et d'après plusieurs spécialistes en mycologie et conservation-restauration, être une biodégradation fongique ou bactérienne. Ce travail de diplôme a pour but d'étudier cette dégradation sur deux modèles, un terminal VT220 et un écran VR201, conservés au Musée Bolo.

Il s'agit d'abord de vérifier l'hypothèse d'une biodégradation, puis le cas échéant, d'émettre d'autres hypothèses de dégradation. Les conditions de conservation des écrans cathodique et les précautions à prendre ne seraient pas les mêmes s'il s'agissait d'une biodégradation ou bien d'une autre cause intrinsèque ou extrinsèque aux objets.

Les écrans cathodiques sont des objets techniques composites, formés de matériaux inorganiques et organiques comme les plastiques, matériaux étant encore très imprévisibles au niveau de leurs dégradations. Il est nécessaire de connaître également leur fonctionnement qui peut aussi être en partie une cause de dégradation.

Ce travail de mémoire se présente en quatre parties :

- La première concerne l'historique et le fonctionnement des écrans cathodiques en général et présente les deux modèles d'écrans étudiés. S'en suit leurs technologies de fabrication et leur description.
- La deuxième partie aborde le constat d'état des deux écrans avec un focus sur l'altération formant des taches. Une caractérisation des polymères et des adhésifs est alors nécessaire pour la compréhension de la dégradation.
- La troisième partie traite les différentes hypothèses de dégradation ainsi que les différents tests effectués pour infirmer ou confirmer ces hypothèses.
- La quatrième partie concerne les préconisations de conservation et il s'en suit la conclusion du mémoire.

Partie I

Présentation des écrans cathodiques

La première partie de ce travail présente l'historique, le fonctionnement, les critères de sélections des écrans étudiés et les technologies de fabrication des écrans cathodiques. S'en suit une description des deux modèles étudiés.

1. Les écrans cathodiques

1.1. Historique général et fonctionnement des écrans cathodiques

Les premiers écrans ont été pensés dès 1880 par plusieurs chercheurs : Constantin Senlecq, Adriano de Paiva et Georg R. Carey¹. Ils ont découvert qu'il était possible de diffuser une image en la projetant sur une surface photosensible constituée de points de sélénium² qui a des propriétés photoélectriques*³. C'est en 1886 que Heinrich Rudolf Herz, physicien allemand⁴, découvre la photoélectricité qui concerne le fait qu'une plaque de métal émet des électrons si elle est soumise à une lumière⁵.

Les tubes cathodiques ont été inventés par Karl Ferdinand Braun, en 1892⁶. Le premier écran à tube cathodique fonctionnait grâce à une diode cathodique froide⁷. La cathode est la source de production des électrons, une électrode métallique chargée négativement et ceux-ci sont dirigés vers l'anode qui est chargée positivement⁸.

Ensuite, le premier tube cathodique à cathode chaude a été inventé par J.B. Johnson et H.W. Weinhart et commercialisé par la société Western Electric en 1922⁹. Ce type de tube cathodique est constitué d'un filament chauffé et de cathodes et anodes qui sont soumises à une différence de tension¹⁰. Celle-ci va créer un champ électrique assez puissant pour arracher les électrons de la cathode et les projeter sous forme d'un faisceau très fin à grande vitesse en direction de l'écran¹¹. Afin de ne pas freiner la trajectoire des électrons, le tube cathodique est sous vide et le champ magnétique créé par des bobines mises sous tension électrique (réflecteurs) va faire en sorte que les électrons soient déviés de gauche à droite et de bas en haut¹². Les réflecteurs dévient donc le flux d'électrons horizontalement et verticalement¹³.

¹ CIGREF, 2016

² Ibidem.

³ Les mots suivis de « * » sont expliqués en glossaire, annexe, p.74

⁴ Encyclopaedia Universalis France (1), 2019

⁵ CIGREF, 2016

⁶ Ibidem.

⁷ Ibidem.

⁸ Ibidem.

⁹ Ibidem.

¹⁰ Ibidem.

¹¹ Ibidem.

¹² Ibidem.

¹³ Ibidem.

De façon générale, les tubes cathodiques peuvent être divisés en cinq sections : la triode, le focus, la déflection*, l'accélération et l'écran¹⁴ (figure 1, p.11).

Le canon à électrons, peut être subdivisé en deux sections, comprenant la triode (source d'électrons) et la lentille de focalisation¹⁵. La triode comprend une cathode, une grille et la première anode qui sert d'accélérateur pour les électrons envoyés en direction de l'écran¹⁶. Lorsque les électrons passent à travers la première anode, ceux-ci partent dans des directions légèrement divergentes, c'est pourquoi il existe une zone de focus qui comprend une lentille permettant aux électrons d'avoir une direction plus convergente en direction de l'écran et passent ainsi dans la seconde anode¹⁷.

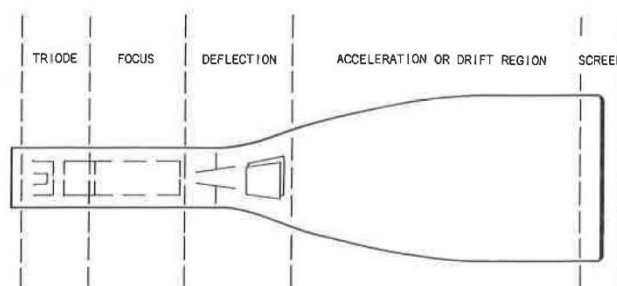


Fig. 1-1. CRT sections.

*Figure 1 Sections d'un écran cathodique
 © DeVere Chuck, 1967, p.1*

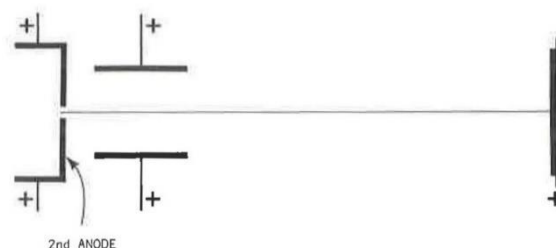


Fig. 6-1. CRT electrical center.

*Figure 2 Centre électrique des écrans cathodiques
 © DeVere Chuck, 1967, p.27*

Le système de déflection permet de dévier le faisceau d'électrons de façon verticale ou horizontale à l'aide de plaques ayant un potentiel égal à celui de la seconde anode lorsque le faisceau d'électron est droit (figure 2, p.11)¹⁸. La tension électrique est modifiée de façon à diriger le faisceau d'électron dans la direction voulue. La zone d'accélération des électrons sert à augmenter la quantité de lumière émise par le matériau luminescent lorsqu'il est traversé par un électron¹⁹. L'intérieur de l'écran cathodique est recouvert d'une fine couche fluorescente* qui, lorsqu'un faisceau d'électron la traverse, va émettre des photons, particules de lumière, c'est pourquoi on entend parler de la luminescence*. Il y a d'ailleurs aussi de la chaleur qui est dégagée par cette action des électrons sur le matériau luminescent, pouvant aller jusqu'à brûler celui-ci. On parle alors de combustion des produits luminescents.

¹⁴ DeVere Chuck, 1967, p.1

¹⁵ Ibidem., p.9

¹⁶ Ibidem.

¹⁷ Ibidem., p.25

¹⁸ Ibidem., p.27

¹⁹ Ibidem., p.48

Afin d'éviter la perte de lumière créée par luminescence, une fine couche d'aluminium se trouve à l'arrière de la couche fluorescente, servant à réfléchir la lumière en direction de l'écran, comme un miroir²⁰ (figure 3, p.12).

L'œil humain est moins réceptif aux rayons lumineux ayant une longueur d'onde dans les bleues (450 nm) ou les rouges (650 nm) et en général, a une sensibilité optimale pour 555 nanomètres de longueurs d'onde, c'est-à-dire dans la région jaune-verte du spectre du visible²¹ (annexe 6, figure 120, p.115). C'est pour cela que les matériaux phosphorescents ou fluorescents ont été choisis dans ce cas, car la longueur d'onde des photons émis par l'excitation de ceux-ci se situe dans le spectre électromagnétique dit du visible, de l'ultraviolet à l'infrarouge²².

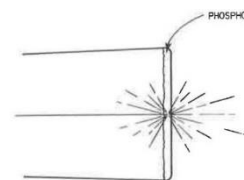


Fig. 15-1. Light scatter of non-aluminized CRT.

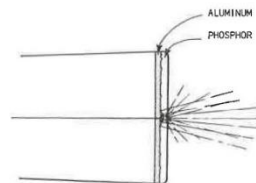


Fig. 15-2. Reduced light scatter of aluminized CRT.

Figure 3 Ecrans cathodiques sans aluminium (haut) et avec aluminium (bas) © DeVere Chuck, 1967, p.79

1.2. Ecrans cathodiques : critères de sélection et objectifs

Avec le Musée Bolo, nous avons décidé d'étudier l'altération de deux écrans cathodiques, un modèle VT220 et un VR201. Ces objets ont été fabriqués et collectés en série et d'autres modèles sont également atteints (annexe 6, tableau 10, p.116-118). Il n'y a pas de volonté de remise en fonction pour ces deux écrans. Il en existe d'autres, des mêmes modèles, qui n'ont pas l'écran altéré.

²⁰ DeVere Chuck, 1967, p.79

²¹ Ibidem., p.63

²² LE FLEM Gille, 29.10.2010 [en ligne], p.4

Cette forme de dégradation est récurrente sur plusieurs modèles différents d'écrans cathodiques et dans les collections de plusieurs institutions, notamment le Musée Bolo, le Musée ENTER, ESCOP²³, et le Computer History Museum. En ne prenant en compte que les écrans du Musée Bolo, nous avons pu constater qu'il y a certaines marques comme DEC (Digital Equipment Corporation), HP (Hewlett-Packard), Thomson et LSI (Lear Siegler INC.) des années 80 qui présentent une altération similaire, atteints de façon plus ou moins importante.

L'écran VR201 est l'un des plus altéré qu'il y a au Musée Bolo, le VT220 est moins altéré mais les écrans cathodiques sont identiques au niveau de leur taille, forme et technologie de fabrication.

1.3. Valeurs culturelles des objets

Les valeurs culturelles associées à un objet permettent de prendre les meilleures décisions en termes de collection, conservation, documentation et numérisation²⁴. Les valeurs culturelles ne sont pas figées dans le temps et sont basées sur plusieurs critères ainsi que des perspectives qui peuvent changer au fil des années²⁵.

Le terminal VT220 et l'écran VR201 sont importants pour le patrimoine culturel technique et technologique, c'est pourquoi le Musée Bolo leur attribue les valeurs suivantes :

- Valeur d'association : le terminal VT220 et l'écran VR201 ont une forte association avec leur entreprise DEC qui a aujourd'hui totalement disparue.
- Valeur historique et scientifique (technologique) : les appareils fabriqués par DEC ont entre autres permis de développer le langage C* et le système d'exploitation UNIX*. Le jeu des caractères de commande* de la série des terminaux VT sera repris dans la communication des systèmes d'exploitation d'aujourd'hui.

²³ European Society for Computer Preservation

²⁴ RUSSEL Roslyn and WINKWORTH Kylie, 2009 [en ligne], p.7

²⁵ Ibidem.

1.4. Fiche d'identité du terminal VT220

Tableau 1 Fiche d'identité de l'écran cathodique VT220 © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

Numéro d'identification ²⁶	Matériaux	Typologie	Dimensions H x L x p [cm] ²⁷
VT220 A	Métal, polymère, verre	Terminal, Modèle : VT220-B, monochrome	30 x 32.5 x 38
Photographie	 <i>Figure 4 Terminal digital VT220 © HE-Arc, N. Nydegger, 2019</i>		
Fonction	Terminal permettant de se connecter à un système central.		
Usage	Fournit une entrée (clavier) et une sortie (écran) à l'utilisateur pour travailler de manière déportée et collective sur l'ordinateur central. Ainsi plusieurs personnes peuvent se partager le temps de travail de la machine centrale.		
Historique	Les terminaux VT220 de 1983 ont amélioré la série des VT100 : les VT220 ont des emballages physiques plus petits et un microprocesseur plus rapide ²⁸ .		
Lieu de conservation actuel	Musée Bolo, EPFL		

²⁶ Numéros attribués aux écrans pour les distinguer dans le travail de Bachelor à l'aide de feuille de papier posée sur les objets

²⁷ Hauteur, longueur et profondeur

²⁸ Cern Document Server, 05.07.2017 [en ligne]

1.5. Fiche d'identité de l'écran VR201

Tableau 2 Fiche d'identité de l'écran cathodique VT220 © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

Numéro d'identification	Matériaux	Typologie	Dimensions H x L x p [cm]
VR201 A	Métal, polymère, verre	Ecran, Modèle : VR201, monochrome	30 x 32.5 x 38
Photographie	 Figure 5 Ecran digital VR201 © HE-Arc, N. Nydegger, 2019		
Fonction	Ecran affichant la sortie d'un ordinateur.		
Usage	Ecran reliés à un ordinateur personnel. Il affiche les données d'un seul ordinateur local (annexe 1, différences de fonctionnement entre le terminal VT220 et l'écran VR201, p.81).		
Historique	Créé depuis 1982 ²⁹		
Lieu de conservation actuel	Musée Bolo, EPFL		

²⁹ Digital, 05.1982 [en ligne]

2. Technologie de fabrication des écrans cathodiques

2.1. L'ampoule de verre

La fabrication des tubes cathodiques commence par la création d'une ampoule de verre moulée et rincée à l'eau à haute pression³⁰. Les ingrédients sont préalablement pesés et mélangés avant l'étape de la fusion qui se déroule dans de grands fours à gaz et l'entonnoir est formé soit par pressage, soit par centrifugation³¹.

Dans les tubes cathodiques monochromes, comme c'est le cas pour les VT220 et VR201, les éléments en verre sont assemblés avant d'être envoyés au fabricant de tubes cathodiques³².

2.2. Le tube cathodique

Une fois arrivé chez le fabricant de tubes cathodiques, l'ampoule de verre est ensuite vaporisée d'acide fluorhydrique, permettant un nettoyage du verre au niveau atomique puis une solution de composés luminescents est versée dans l'ampoule³³. Le mélange va se déposer sur l'avant de l'ampoule et créer des liaisons chimiques avec celle-ci³⁴. Une laque incolore est ensuite vaporisée par centrifugation sur l'ampoule de verre afin de protéger la couche luminescente et ce de façon uniforme³⁵. Ensuite, une couche conductrice est placée sur ce que l'on appelle le bouton d'anode (figure 6, p.16) afin que les électrons puissent suivre une trajectoire définie à l'intérieur de l'ampoule.



Figure 6 VR201, Bouton d'anode
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019

L'ampoule de verre est ensuite placée sur une bobine de tungstène sur laquelle une pastille en aluminium a été placée et l'air peut être évacué grâce à un appareil à faire le vide, puis un courant

³⁰ Comment c'est fait, 04.07.2014 [en ligne]

³¹ Expert tv vidéo [en ligne]

³² Ibidem.

³³ Comment c'est fait, 04.07.2014 [en ligne]

³⁴ Ibidem.

³⁵ Ibidem.

électrique est appliqué dans la bobine³⁶. La pastille d'aluminium va alors, en chauffant et se volatilisant, enduire l'intérieur de l'ampoule d'un revêtement ressemblant à un miroir³⁷.

Après quoi l'ampoule est chauffée à 218°C pendant une heure afin que la laque puisse cuir et l'humidité s'évaporer³⁸. Suite à cela un col en verre est rajouté à la base de l'ampoule par fusion et un revêtement conducteur est à nouveau appliqué à l'intérieur de la base de l'ampoule³⁹. C'est dans cette partie que le canon à électron, assemblé de plusieurs composants, sera inséré. Les grilles sont superposées, alignées et soudées à l'aide de verre de soudure et serviront à focaliser les électrons en direction de la couche luminescente⁴⁰.

Le col en verre est alors retravaillé et ajusté au culot du canon à électron et le tout est chauffé à 400°C pendant une durée de deux heures et un vide est recréé⁴¹.

Pour réduire le scintillement de l'image créé pendant la durée de vie du tube cathodique, celui-ci est conditionné grâce à une bobine à haute tension, capable de lisser toute rugosité de surface au niveau du canon à électrons⁴². Enfin, des connexions électriques sont fixées au canon à électron pour vérifier si celui-ci fonctionne⁴³.

2.3. L'écran de protection anti-implosion

En plus de l'écran cathodique, un verre de protection contre les risques d'implosion* a été inventé en 1979 par Richard A. Nolan⁴⁴. Celui-ci consiste surtout à limiter les dégâts si une personne devait se trouver devant l'écran pendant une implosion⁴⁵. Il est collé contre le verre de l'ampoule et une bande adhésive entoure l'écran de protection. Nous pensons que l'adhésif a été coulé par un côté de l'écran afin de faire adhérer l'écran de protection mais ceci n'est qu'une hypothèse (figure 7, p.17). L'adhésif le maintenant serait à base de polyuréthane.



Figure 7 Ecran VR201, zone d'injection de l'adhésif ? © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

³⁶ Comment c'est fait, 04.07.2014 [en ligne]

³⁷ Ibidem.

³⁸ Ibidem.

³⁹ Ibidem.

⁴⁰ Ibidem.

⁴¹ Ibidem.

⁴² Ibidem.

⁴³ Ibidem.

⁴⁴ RICHARD A. Nolan, 19.06.1979 [en ligne]

⁴⁵ Ibidem.

3. Description des objets

3.1. Description du terminal VT220

Le terminal VT220 est composé de plusieurs parties distinctes : le boîtier en plastique rigide (figure 8, p.18), l'écran cathodique en verre avec des composants électroniques en métal et plastique (figure 9, p.18), le circuit imprimé comportant les composants de fonctionnement, le circuit imprimé incluant les composants de l'ordinateur (figure 10, p.18) ainsi que le châssis avec les composants de l'anode (figure 11, p.18).



Figure 8 VT220, boîtier en plastique
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019



Figure 9 VT220, tube cathodique
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019

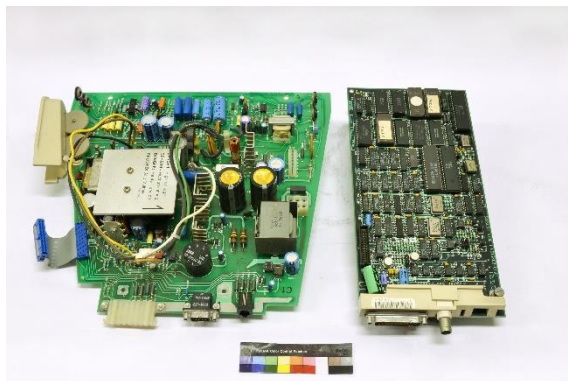


Figure 10 VT220, deux circuits imprimés.
Gauche : les composants de fonctionnement.
Droite : l'ordinateur © HE-Arc, N. Nydegger, 2019



Figure 11 VT220, châssis avec les composantes
de l'anode © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

3.2. Description de l'écran VR201

L'écran VR201 n'est lui composé que de trois parties distinctes : le boîtier en plastique rigide (figure 12 et 15, p.19), l'écran cathodique en verre avec des composants électroniques en métal et plastique (figure 14, p.19) et le circuit imprimé comportant les composants de fonctionnement (figure 13, p.19). Dans ce modèle il n'y a pas d'ordinateur intégré comme pour les VT220. Il fallait connecter l'écran à un ordinateur externe pour pouvoir l'utiliser.



Figure 12 VR201, écran et boîtier
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019

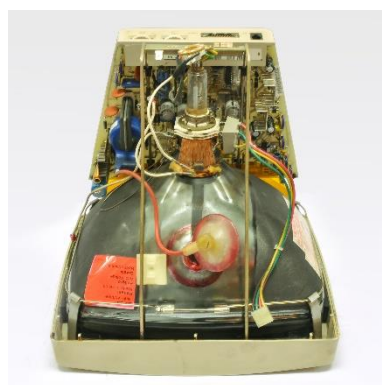


Figure 13 VR201, composants de fonctionnement
et tube cathodique © HE-Arc, N. Nydegger, 2019



Figure 14 VR201, tube cathodique
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019



Figure 15 VR201, boîtier en plastique avec plaques
de cuivre © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

3.3. Matériaux constitutifs des écrans cathodiques

Les écrans à tube cathodique sont composés de matériaux divers et variés, principalement du métal et des polymères synthétiques pour le boîtier et les composants électroniques ainsi que du verre au niveau du canon à électron, de l'ampoule (contenant du vide et l'écran luminescent) et l'écran de protection. Des analyses de compositions ont été effectuées sur l'adhésif de l'écran de protection (p.37-41).

Partie II

Constat d'état et caractérisation des polymères

La deuxième partie comporte les constats d'état des deux écrans cathodiques ainsi qu'une description plus détaillée de la dégradation étudiée.

4. Constat d'état : Observation visuelle de l'altération

En annexe se trouve des tableaux avec les photographies générales du VT220 et VR201 (annexe 6, tableaux 11 et 12, p.119-120) ainsi que des tableaux de constat d'état général (annexe 6, tableaux 13 et 14, p.21-123). Les photographies des écrans seuls (sans leur boîtier) ont été prises avec l'écran posé sur le haut pour ne pas risquer d'abîmer la zone de l'anode⁴⁶. Pour observer correctement les écrans atteints il a fallu les démonter, ainsi des protocoles de démontage et remontage ont été rédigé (annexe 2, p.83-97) et il a fallu prendre des précautions avec la manipulation d'objets électroniques (annexe 1, p.81)

4.1. Constats d'état de l'écran du terminal VT220

Tableau 3 Constat de l'altération sur l'écran VT220 © HE-Arc, N. Nydegger

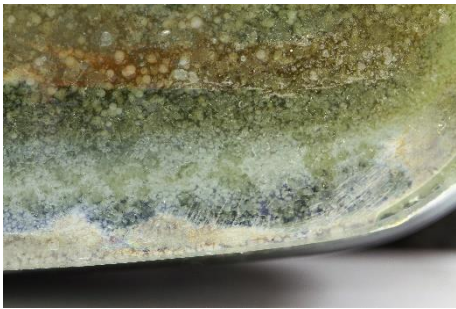
Zone de description	Photographie
On observe des empreintes de doigts sur le verre de l'écran et probablement dans la colle, des sphères cristallines de taille et de couleur différentes, du blanc, passant par du jaune et du vert (attention, les couleurs ne sont pas forcément représentatives et la colle a jauni). Une concentration plus élevée de ces sphères se trouvent aux bords de l'écran.	
Zone plus centrée que la photo précédente. On observe comme une sorte de voile en bas de la photographie.	

Figure 16 Coin en bas à droite de l'écran VT220, de face © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

Figure 17 Coin en bas à droite de l'écran VT220 (un peu plus centré) © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

⁴⁶ La zone du bouton d'anode se trouve sur le bas de l'écran

On constate qu'il y a beaucoup moins de points plus on se rapproche du centre de l'écran. Ici on n'observe plus que de petits points foncés dans les tons bleus-violet.



*Figure 18 Proche du centre de l'écran VT220
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019*

On constate qu'il y a une bande adhésive qui fait tout le tour de l'écran et se superpose sur le bas de celui-ci. Cette zone de la bande adhésive paraît plus altérée. Il y a la présence de taches de forme circulaires, jaunâtres et d'autres à l'aspect plus cristallin et blanc. Il y a aussi des grains jaunâtres qui s'effritent sur les côtés de la bande adhésive.



*Figure 19 Zone de superposition de la bande adhésive qui fait le tour de l'écran VT220
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019*

Sur le côté gauche de l'écran se trouve comme une sorte de joint qui a été coupé. Il est probable qu'il s'agisse de la zone par laquelle la colle a été coulée et la bande adhésive ne recouvre pas ce joint. Il y a une seconde bande adhésive perpendiculaire à celle qui fait le tour de l'écran, uniquement à sur cette partie. Cette zone semble également plus altérée que le reste des contours de l'écrans.



*Figure 20 Côté gauche de l'écran VT220
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019*

Des photographies présentant une vue d'ensemble de l'écran se trouvent en annexe (annexe 6, figure 152, p.124).

Le VT220 est moins altéré que le VR201 et grâce à des photographies et vidéos, il a été possible de constater que les taches sont plutôt en surface, ou en tout cas qu'il y a assez de profondeur pour qu'il y ait de l'ombre (annexe 6, figures 153 et 154, p.124).

4.2. Constat d'état de l'écran VR201

Tableau 4 Constat de l'altération sur l'écran VR201 © HE-Arc, N. Nydegger

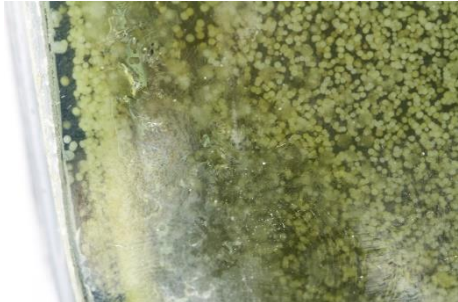
Zone et description	Photographie
Présence d'empreintes de doigts sur le verre de l'écran et des sphères cristallines de taille et de couleurs différentes. Une concentration plus élevée de ces sphères se trouvent aux bords de l'écran.	

Figure 21 Un peu au-dessus du coin gauche, de face, écran VR201 © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

Sur le côté gauche de l'écran, on observe des zones qui ont l'air moins altérées. Il y a des zones à l'aspect plus cristallin.

Avec une source de lumière supplémentaire, on remarque que la colle est transparente et on voit encore mieux l'effet de profondeur. On voit mieux certaines zones cristallines.



Figure 22 Côté gauche, de face, écran VR201 © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

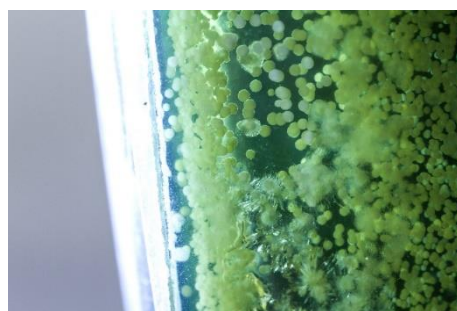


Figure 23 Même zone illuminée par une petite lampe de poche depuis l'arrière © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

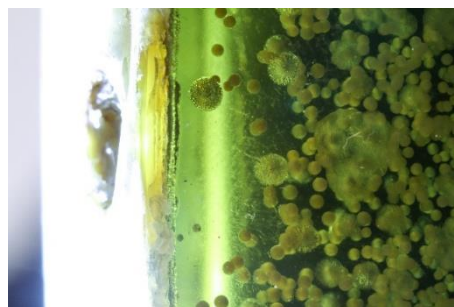
Au niveau du joint, de face, la zone semble moins altérée.

On observe plus facilement l'altération avec beaucoup de lumière. Ici aussi l'adhésif paraît transparent et on constate qu'il y a comme un agglomérat de matière sur la droite de l'image.

On voit également mieux les formes cristallines.

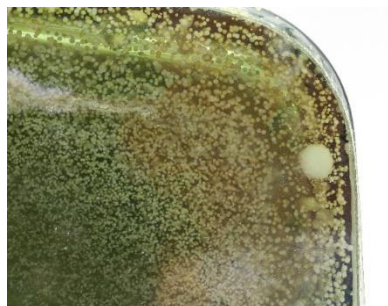


*Figure 24 Joint, côté gauche de face, écran VR201
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019*



*Figure 25 Même zone illuminée par une petite lampe
de poche, écran VR201 © HE-Arc, N. Nydegger, 2019*

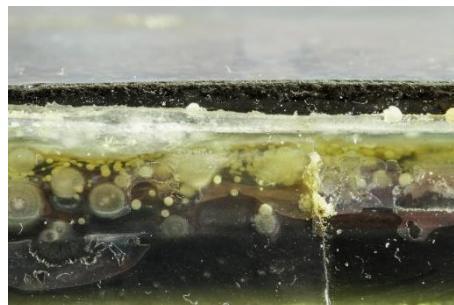
C'est la seule zone où on remarque une tache blanche opaque et bien plus large que les autres sphères.



*Figure 26 Coin supérieur droit, de face, écran VR201
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019*

On constate qu'il y a une bande adhésive qui fait tout le tour de l'écran et se superpose sur le bas de celui-ci. Cette zone de la bande adhésive paraît plus altérée.

Il y a la présence de taches de forme circulaire, jaunâtres et d'autres à l'aspect plus cristallin et blanc. Il y a aussi des grains jaunâtres qui s'effritent sur les côtés de la bande adhésive.



*Figure 27 Zone de superposition de la bande adhésive,
bas de l'écran VR201 © HE-Arc, N. Nydegger, 2019*

Des photographies présentant une vue d'ensemble de l'écran se trouvent en annexe (annexe 6, figure 155, p.125).

Une prise d'échantillons de l'adhésif et de la bande adhésive sur l'écran VR201, le plus altéré, a permis de faire un constat plus détaillé sur ces matériaux. L'échantillon de la bande adhésive est incolore et le côté extérieur est lisse tandis que le côté intérieur, qui était collé sur le reste de la bande adhésive là où il y a superposition, est altéré. Le côté lisse, donc extérieur, reflète la lumière et on voit l'altération en forme de cercle d'aspect cristallin avec un centre qui semble moins atteint et qui se trouve sur l'autre face de l'adhésif (figure 28, p.25). L'autre face reflète également la lumière mais semble moins lisse et l'altération semble volumineuse, comme s'il y avait une efflorescence*. Il respecte toutefois son rôle d'adhésif.

L'échantillon de l'adhésif est jaune, transparent, un peu souple et à la fois cassant. Il respecte à première vue encore son rôle d'adhésif. Les sphères blanches ne sont pas souples et ont un aspect cristallin sous binoculaire (figure 29, p.25). Les sphères peuvent être écrasées avec la pointe d'un bâtonnet en bois mais s'abîment et des morceaux se détachent si on applique une pression plus élevée (figures 30 et 31, p.25). Certaines zones reflètent la lumière et l'adhésif peut être déformé par pression mais il reprend sa forme initiale rapidement.

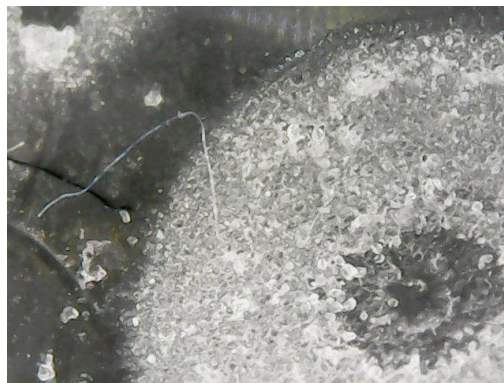


Figure 28 Bande adhésive, altération d'aspect cristallin et de forme concentrique © HE-Arc, N. Nydegger, 2019



Figure 29 Echantillon d'adhésif avec quelques sphères © HE-Arc, N. Nydegger, 2019



Figure 30 échantillon d'adhésif © HE-Arc, N. Nydegger, 2019



Figure 31 Même échantillon d'adhésif après avoir cherché à gratter la sphère avec la pointe d'un scalpel © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

4.3. Observation de la bande adhésive entourant l'écran de protection

L'adhésif sur les côtés de l'écrans semble faire tout le tour de celui-ci et n'est pas forcément là depuis sa création, il a pu être rajouté plus tard dans la vie de cet écran. Afin d'approfondir et de vérifier cette hypothèse, il est possible de détacher un bout de l'adhésif : on découvre que la bande adhésive fait bien le tour de l'écran et se superpose sur environ 10 cm pour l'écran VR201. Même observation pour le VT220 et le deuxième VR201 très altéré.

On peut considérer que cette bande adhésive n'est pas un ajout après création mais qu'il fait bien partie du produit fini étant donné qu'on a pu l'observer sur les trois écrans démontés.

Pour les divers prélèvements et les observations, la bande adhésive a été retirée sur le bas (annexe 6, figure 156, p.126) lors de la deuxième semaine de travail.

Six semaines plus tard, on observe une exsudation* au niveau de l'adhésif, là où on a retiré la bande adhésive pour les prélèvements (figure 32, p.26). Au début, il n'y avait pas d'exsudation, ce qui atteste d'une dégradation active. L'adhésif et ses additifs ne sont donc pas stables et réagissent fortement à l'exposition à l'atmosphère en atelier.



Figure 32 Exsudation observée sous la bande adhésive et sur l'adhésif entre l'écran de protection et l'écran du tube cathodique © HE-Arc, N. Nydegger 2019

4.4. Stratigraphie de l'adhésif altéré

Une stratigraphie de l'écran et plus précisément de l'adhésif altéré permet d'avoir un aperçu schématique et en partie hypothétique de l'impact de l'altération sur la surface et la profondeur du matériau (figure 33, p.27). Celle-ci a été conçue à l'aide d'un appareil photographique (objectif macro

100mm) afin d'observer la profondeur de champs et surtout les diverses parties nettes, en partant de la surface de l'écran protecteur jusqu'à l'adhésif en-dessous.

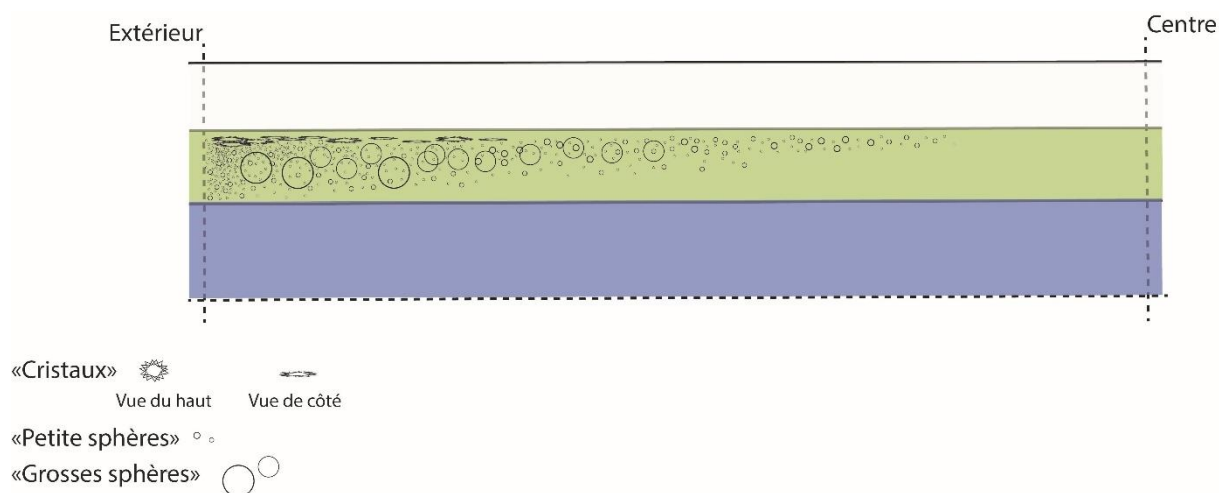


Figure 33 Stratigraphie hypothétique de l'altération observée © HE-Arc, N. Nydegger 2019

5. Caractérisation des polymères et des adhésifs

5.1. Les polymères

Le qualificatif « plastique » provient du fait que la matière peut être moulée ou modelée à volonté dans des formes préalablement déterminées. A noter que les polymères n'ont pas toujours des caractéristiques plastiques⁴⁷.

Ainsi, un polymère est créé par polymérisation* de monomère, petites molécules basées sur un squelette d'atomes de carbone avec le plus souvent des atomes d'hydrogène et parfois des atomes d'oxygène, d'azote ou autre. En général les monomères sont fabriqués à partir de méthane, d'éthylène, de benzène, et de butadiènes qui proviennent directement de la distillation du pétrole (parfois charbon, gaz naturel, bois et autres substances végétales)⁴⁸.

Dans les appareils électroniques comme les ordinateurs, le boîtier est en plastique mais il y en a aussi au niveau des circuits imprimés et intégrés, jouant un rôle d'isolant électrique.

⁴⁷ BOUDET Alain. 2003, p.18

⁴⁸ Ibidem., p.31

Les propriétés des polymères sont tout aussi variées que leurs utilisations et il en résulte des qualités différentes recherchées par les industries⁴⁹ :

- Les propriétés mécaniques : la dureté, la flexibilité, la résistance à la rupture ou aux chocs
- Les propriétés optiques : la transparence et la couleur
- Les propriétés électriques : isolant ou conducteur
- Les propriétés chimiques : résistance aux agents chimiques
- Les propriétés thermiques : sensibilité à certaines températures

Toutes ces propriétés dépendent de la microstructure des matériaux et donc de leurs architectures moléculaires⁵⁰. Une autre caractéristique importante lorsqu'on parle de polymères est donc la masse moléculaire. Il en existe une multitude, si bien qu'il est préférable de parler de répartition de la masse moléculaire d'un polymère, pouvant être représentée par un graphique⁵¹ (figure 34, p.28).

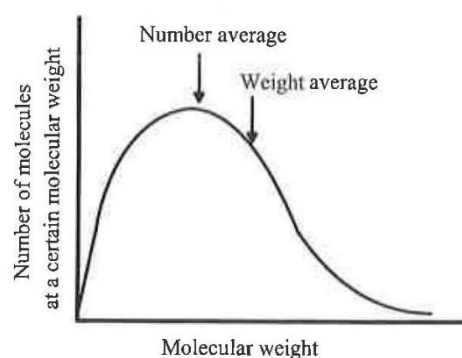


Figure 34 Distribution schématique de la masse moléculaire d'un polymère

© PONCIUS V. Alphonsus, 2002, p.120

Il existe trois grands groupes de polymères : les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères.

Les polymères thermoplastiques sont faits de macromolécules linéaires ou ramifiées qui maintiennent leur cohésion par liaisons chimiques dites secondaires⁵². Lorsqu'un thermoplastique est chauffé il devient plastique et peut ainsi être moulé⁵³. A température ambiante il est en général rigide. Il y a deux catégories de thermoplastiques : les amorphes* et les semi-cristallins. Lorsqu'ils sont amorphes ils sont incolores, plutôt transparents et souvent cassants⁵⁴.

Les polymères thermodurcissables sont fortement réticulés* pendant le façonnage, les rendant moins flexibles que les thermoplastiques, qui eux sont fait d'un réseau tri-dimensionnel. Les thermodurcissables sont durs et cassants⁵⁵. Les élastomères sont constitués de macromolécules linéaires avec peu de ramifications, leur permettant d'être déformés et étirés sous contraintes⁵⁶.

⁴⁹ BOUDET Alain. 2003, p.19

⁵⁰ Ibidem.

⁵¹ PONCIUS V. Alphonsus, 2002, p.120

⁵² QUYE Anita, WILLIAMSON Colin, 1999, p.26

⁵³ Ibidem.

⁵⁴ Ibidem.

⁵⁵ Ibidem.

⁵⁶ Ibidem., p.27

Il est difficile d'identifier des polymères. Souvent les objets en plastiques sont faits de mélanges de polymères différents et/ou sont mélangés avec des matériaux non-polymère afin d'améliorer certaines de leurs caractéristiques⁵⁷. Il existe plusieurs techniques d'analyses des surfaces modernes (annexe 5, techniques d'analyses des polymères, p.111) comme l'analyse FTIR qui a été utilisée pour cette étude. Les résultats sont présentés dans la troisième partie du mémoire.

5.2. Les adhésifs

De façon générale les adhésifs sont fragilisés par la présence d'eau ou de vapeur d'eau, ne supporte pas des températures trop basses ou trop élevées et sont limités par leur température de transition vitreuse* ainsi que leur dégradation chimique⁵⁸. La température de transition vitreuse, facilement reliée aux propriétés adhésives, peut être mesurée grâce à l'analyse mécanique dynamique ou encore par calorimétrie à balayage différentiel⁵⁹. Les adhésifs contiennent tous des polymères car ils apportent de la force de cohésion⁶⁰ et la plupart contiennent des additifs.

Il existe en tout six théories d'adhésion⁶¹ : l'adsorption physique*, les liaisons chimiques*, la diffusion*, l'adhésion électrostatique*, le verrouillage mécanique* et les couche de liaisons faibles*.

Concernant le verre de l'écran, il est possible que le produit d'étanchéité contenu dans l'adhésif soit un polysulfure⁶². C'était le plus souvent le cas pour les colles commerciales pour verre⁶³. Lorsque l'adhésif est exposé à l'eau ou l'air humide⁶⁴ pendant le séchage, il est possible qu'il y ait la présence d'agent de couplage silane*. Les silanes engendrent des réactions d'hydrolyse en présence d'eau, se modifiant en silanols qui se condensent spontanément, produisant des oligomères* silanols⁶⁵ (figure 35, p.29). Les oligomères, normalement solubles dans l'eau, peuvent créer des liaisons avec une surface

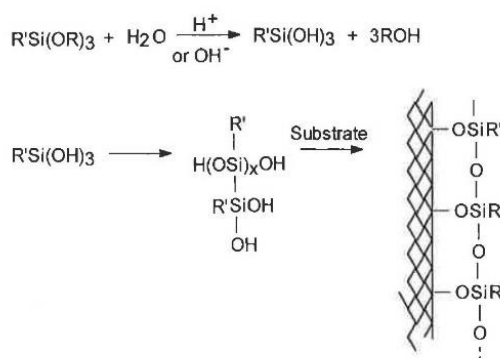


Figure 6.14 Diagram showing the proposed action of silanes on inorganic surfaces.

Figure 35 Supposée action des silanes sur une surface inorganique © PONCIUS V. Alphonsus, 2002, p.145

⁵⁷ BOUDET Alain. 2003, p.99

⁵⁸ COMYN John. 1997, p.2

⁵⁹ POCIUS V. Alphonsus, 2002, p.123

⁶⁰ COMYN John. 1997, p.4

⁶¹ Ibidem.

⁶² Ibidem.

⁶³ Ibidem.

⁶⁴ Ibidem.

⁶⁵ POCIUS V. Alphonsus, 2002, p.153

contenant un groupe hydroxyle. Ainsi une sorte d'adhésion chimique est créée entre un adhésif et une surface inorganique, comme cela peut être le cas entre la colle et le verre de protection anti-implosion. Sans cela l'eau peut se diffuser le long de l'interface verre-résine et peut provoquer des résultats catastrophiques⁶⁶.

Un polymère peut aussi être amélioré en y insérant des monomères différents. Ils sont alors associés chimiquement et forment ce que l'on appelle un copolymère. Les liaisons chimiques créées ici font que les copolymères sont plus performants que les mélanges de polymères⁶⁷.

5.3. L'adhésif de polyuréthane

D'après la littérature et surtout le brevet de fabrication de Richard A. Nolan l'écran de protection anti-implosion serait collé grâce à un adhésif à base de polyuréthane⁶⁸.

Le polyuréthane est un polymère qui contient le groupe uréthane dans sa structure⁶⁹ (figure 36, p.30). Un adhésif à base de polyuréthane contiendrait des groupes aliphatiques, des hydrocarbures aromatiques, des esters, des amides, de l'urée, et des groupes allophanes⁷⁰. Il se forme par réaction d'addition de diisocyanates ou polyisocyanates avec des polyols et subit des réactions de polymérisation⁷¹ (figure 37, p.30). La réticulation est alors catalysée par l'humidité ambiante et, afin d'éviter la formation de bulles, l'assemblage est maintenu sous pression⁷². En fonction des groupes fonctionnels des monomères un polyuréthane peut être thermoplastique ou thermodurcissable⁷³.

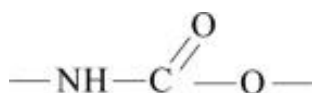


Figure 36 Groupe uréthane © J. LICARI
James, W. SWANSON Dale, 2005 [en ligne]

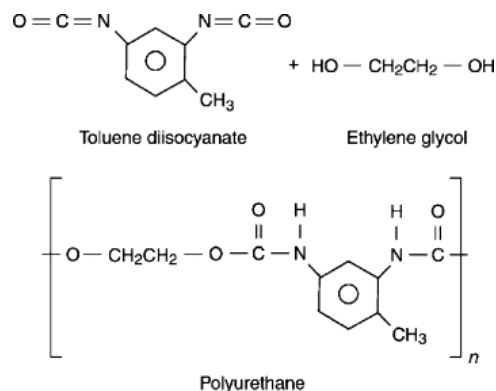


Figure 37 Fabrication du polyuréthane © J. LICARI
James, W. SWANSON Dale, 2005 [en ligne]

⁶⁶ COMYN John. 1997, p.28

⁶⁷ BOUDET Alain. 2003, p.115

⁶⁸ RICHARD A. Nolan, 19.06.1979 [en ligne]

⁶⁹ J. LICARI James, W. SWANSON Dale, 2005 [en ligne]

⁷⁰ Ibidem.

⁷¹ Ibidem.

⁷² FOULC Marie-Pierre, ALCORTA José [en ligne]. 05.08.2008, p.14

⁷³ J. LICARI James, W. SWANSON Dale, 2005 [en ligne]

Les adhésifs de polyuréthane sont essentiellement utilisés pour l'assemblage de larges composants sur les circuits imprimés comme les condensateurs, les bobines, les dissipateurs thermiques et les connecteurs⁷⁴. Ceci est dû au fait que le matériau a des propriétés pratiques dans ce domaine : il est flexible, absorbe les contraintes mécaniques, amortit les vibrations et est thermo conducteur⁷⁵. Ce type d'adhésif est aussi utilisé pour des assemblages d'éléments en sandwichs, composés de panneaux stratifiés en plastiques ou encore de métaux comme l'aluminium⁷⁶. Il existe encore d'autres polymères utilisés dans l'électronique de façon générale (annexe 1, d'autres polymères dans l'électronique, p.82).

5.4. Les adjuvants des colles synthétiques

Les adhésifs sont tous à base de polymères car ils apportent de la force de cohésion⁷⁷ et la plupart contiennent des additifs comme des agents de stabilisation contre les dégradations ou bien simplement pour améliorer certaines caractéristiques : des antioxydants, des protections contre les ultraviolets, des plastifiants et de la matière minérale en poudre ou encore des agents collants et agents de couplage⁷⁸ silane. Ces adjuvants sont nombreux et les plus fréquents sont listés dans un tableau (annexe 6, figure 176 p.134).

⁷⁴ J. LICARI James, W. SWANSON Dale, 2005 [en ligne]

⁷⁵ Ibidem.

⁷⁶ FOULC Marie-Pierre, ALCORTA José [en ligne]. 05.08.2008, p.14

⁷⁷ COMYN John. 1997, p.4

⁷⁸ Ibidem.

Partie III

Hypothèses de dégradation

La troisième partie présente les différentes hypothèses de dégradations basées sur les observations, la littérature et les avis de professionnels en conservation-restauration, mycologie et chimie. Les hypothèses sont soutenues ou réfutées par les différents tests et analyses.

6. Analyses, tests et hypothèses de dégradation

Grâce aux observations et aux recherches effectuées, il a été possible de créer un schéma dans lequel les matériaux et phénomènes potentiellement en jeu dans la formation de l'altération étudiée sont localisés (annexe 6, figures 177 et 178, p.135 et 136).

6.1. Les dégradations des polymères et focus sur le polyuréthane

La dégradation des polymères concerne tout changement qui a un effet néfaste sur leurs propriétés⁷⁹. Les agents de dégradation des polymères sont nombreux et variés : la chaleur, la lumière, les polluants atmosphériques comme l'oxygène, l'ozone, le dioxyde de soufre et le dioxyde d'azote peuvent déclencher des processus de dégradation même en faible quantité ainsi que les réactions d'hydrolyse et la biodégradation⁸⁰. Ce sont tous des agents de dégradations dit chimiques⁸¹.

Le polyuréthane est particulièrement sensible à la dégradation thermique, la photo-oxydation et la biodégradation⁸².

Les isocyanates organiques peuvent réagir rapidement avec des substances comportant des atomes d'hydrogènes actifs qu'on peut retrouver dans plusieurs groupes fonctionnels : les hydroxyles (OH), les mercaptans (SH), les imines (NH), les amines (NH₂), les uréthanes (NHCO-O), les urées (NHCONH), les carboxyles (CO₂H), les amines acides (CONH₂), les thioamides (CSNH₂), les sulfoniques (SO₂OH) et bien d'autres encore⁸³. Ces groupes fonctionnels pourraient donc réagir avec les isocyanates et perturber la composition du matériau de base.

6.1.1. La dégradation thermique

La dégradation thermique peut survenir dès la mise en œuvre des plastiques à des températures plus ou moins basses⁸⁴.

⁷⁹ ALLEN N.S. EDGE M. and HORIE C.V., 1992, p.14

⁸⁰ Ibidem., p. 18-19

⁸¹ LIPPINCOTT & PETO, 1990 [en ligne]

⁸² ALLEN N.S. EDGE M. and HORIE C.V., 1992, p.31

⁸³ HEPBURN Claude, 1992, p.224

⁸⁴ MAIRESSE M & CO. 1999 [en ligne]

Concernant les plastiques contenant des supports électroniques, ceux-ci peuvent subir des dégradations physiques en se déformant de façon irréversible à partir de températures supérieures à 60°C⁸⁵. Pour le polyuréthane, la dégradation thermique (sans flammes) se produit à partir de 150°C environ⁸⁶. Quelques détails concernant la dégradation thermique se trouvent en annexe (annexe 3, p.98).

La dégradation thermique peut donc survenir lors de la fabrication de la résine et provoquer des résultats inattendus lors de l'utilisation et le vieillissement des écrans cathodiques. De plus les adhésifs de polyuréthane à base d'éther se dégradent par oxydation et jaunissent rapidement s'ils sont exposés à une température de 50°C et plus⁸⁷, température pouvant être atteinte lors de l'utilisation des écrans cathodique. Cela expliquerait en partie le jaunissement de l'adhésif.

Enfin une température inadéquate et surtout élevée accélère la vitesse des dégradations⁸⁸ de façon générale.

La dégradation thermique ne jouerait pas un rôle direct dans la migration d'un produit mais participerait en partie à la dégradation de l'adhésif et ses adjuvants.

6.1.2. La photodégradation

Il est important de spécifier que, lorsqu'on parle de la photodégradation, il s'agisse de rayonnements électromagnétiques de longueurs d'onde différentes et que les dégradations sont causées par les énergies des photons qui sont propres à chaque longueur d'onde⁸⁹. Bien évidemment, la lumière du visible, les rayons infrarouges, les rayons ultraviolets et les rayons-X font donc partie des agents de dégradation des polymères⁹⁰.

Les rayons ultraviolets (~ 400 nm) ont suffisamment d'énergie pour détruire certaines liaisons chimiques⁹¹. Les liaisons carbone-carbone, carbone-oxygène et carbone-chlore y sont sensibles tandis qu'il faut plus d'énergie pour casser les liaisons carbone-hydrogène et carbone-brome⁹². Les détails de la réaction induite par la photodégradation se trouvent en annexe (annexe 3, p.98).

Le jaunissement de l'adhésif peut également être dû à la formation des structures conjuguées* elles-mêmes causées par la photodégradation⁹³. La photodégradation modifie de manière irréversible la

⁸⁵ MICHALSKI Stefan, 17.05.2018 [en ligne]

⁸⁶ American Chemistry Council, février 2008 [en ligne]

⁸⁷ Selon entretien avec Yvonne Shashoua

⁸⁸ BERGERON André et NAUD Colette, 16.06.2016 [en ligne]

⁸⁹ MICHALSKI Stefan, 05.07.2018 [en ligne]

⁹⁰ ALLEN N.S. EDGE M. and HORIE C.V., 1992, p.18

⁹¹ Ibidem., p.25

⁹² Ibidem., p.23

⁹³ Ibidem., p.27

structure des polymères⁹⁴ mais ne jouerait pas un rôle direct dans la migration d'un produit. Elle participerait en partie à la dégradation de l'adhésif et ses adjuvants.

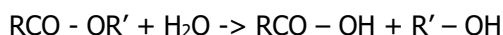
6.1.3. L'hydrolyse et tests de mesure de l'acidité

L'hydrolyse est une réaction chimique de décomposition qui se produit en présence d'eau⁹⁵.

Dans des composés organiques, la réaction est illustrée par la réaction de l'eau avec un ester d'un acide carboxylique, impliquant plusieurs étapes de réaction⁹⁶ :

- 1) Formation d'une liaison covalente entre l'atome d'oxygène de la molécule d'eau et l'atome de carbone de l'ester.⁹⁷
- 2) La liaison carbone-oxygène de l'ester se casse et un ion hydrogène se détache, un acide carboxylique et un alcool se forment⁹⁸.

Réaction complète :



RCO - OR' : Ester H₂O : Eau RCO - OH : Acide carboxylique R' - OH : Alcool

Un acide ou une base augmenterait la probabilité que la réaction d'hydrolyse se produise⁹⁹.

Les réactions d'hydrolyses sont possibles dans les polymères synthétiques comprenant de l'ester, de l'amide, ou encore de l'uréthane et dans les polysaccharides et protéines naturelles¹⁰⁰. En général une humidité relative assez haute et un pH plus petit que 7 favorise les réactions d'hydrolyses¹⁰¹.

Lors de la fabrication des polyuréthanes celui-ci contient entre autres des groupes uréthane qui sont facilement hydrolysables, c'est-à-dire qu'ils peuvent réagir avec l'eau qui va alors créer des scissions et réductions de la masse moléculaire du polymère¹⁰². L'un des réactifs lors de la fabrication du polyuréthane contient soit des groupes éther soit ester (polyéther diol ou polyester diol) et les groupes esters seraient alors plus susceptibles de s'hydrolyser¹⁰³.

Les tests de mesure du pH indiquent qu'il y a une acidité élevée (pH 3-4) dans les échantillons testés ce qui est un indice suggérant que des réactions d'hydrolyse sont en jeu dans l'altération de la matière (annexe 4, tests de mesure de l'acidité, p.101-102).

⁹⁴ RAMEL Sylvie, 15.09.2007 [en linge]

⁹⁵ Encyclopaedia Britannica, 2019 [en ligne]

⁹⁶ Ibidem.

⁹⁷ Ibidem.

⁹⁸ Ibidem.

⁹⁹ Ibidem.

¹⁰⁰ ALLEN N.S. EDGE M. and HORIE C.V., 1992, p.30

¹⁰¹ Ibidem.

¹⁰² MYER Ezrin, 1996, p.19

¹⁰³ Ibidem., p.20

L'adhésif étudié sur les écrans cathodiques n'a pas l'air d'être étanche à l'humidité. Si l'humidité de l'air arrive à s'infiltrer jusqu'à l'adhésif et pénétrer plus en profondeur, cela expliquerait pourquoi les zones externes sont plus altérées que le centre de l'écran. De plus une humidité relative élevée favoriserait l'action dégradante des polluants atmosphériques acides, comme le dioxyde de soufre et le dioxyde d'azote, ainsi que d'autres sous-produits acides provenant de la dégradation¹⁰⁴. L'hydrolyse pourrait participer directement à la formation de l'altération observée et induire des réactions de dégradation sur l'adhésif et ses adjuvants.

6.2. Les dégradations liées aux polluants atmosphériques

6.2.1. L'oxygène

Les plastiques sont de façon générale sensible à l'oxygène et ce type de dégradation provient entre autres des effets combinés de la dégradation thermique et de la photodégradation¹⁰⁵. Ainsi une oxydation provoquée par l'oxygène de l'air donne un résultat similaire de la photodégradation et de la dégradation thermique. La réaction est similaire à l'auto-oxydation présentée dans le chapitre traitant la photodégradation. Le radical libre formera des liaisons avec l'oxygène de l'air.

Réaction chimique :



O₂ : Oxygène (atmosphère)

RO : Groupe carboxyle

R• : Radical libre → R'H : Acide

OH : Groupe hydroxyle

L'oxygène de l'air peut donc avoir un rôle dans plusieurs processus de dégradation ainsi que participer au jaunissement du polyuréthane. Une oxydation se fera encore plus facilement en présence d'ozone car c'est un oxydant puissant¹⁰⁶.

¹⁰⁴ ICC, 03.05.2019 [en ligne]

¹⁰⁵ ALLEN N.S. EDGE M. and HORIE C.V., 1992, p.28

¹⁰⁶ TETRAULT Jean. 18.05.2018 [en ligne]

6.2.2. Le dioxyde d'azote

Les polyuréthanes sont sensibles aux attaques de dioxyde d'azote provoquant des scissions et réticulation des chaînes du polymère¹⁰⁷.

Réaction chimique :

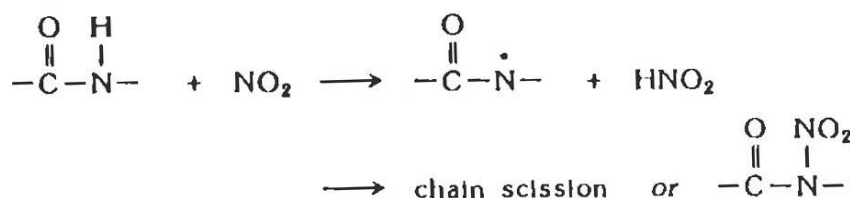


Figure 38 Action du dioxyde d'azote sur le polyuréthane © ALLEN N.S. EDGE M. and HORIE C.V., 1992, p.29

Le groupe uréthane formera de l'acide nitreux en présence de dioxyde d'azote résultant en une scission de la chaîne polymérique ou bien il se formera une réticulation.

Les polluants de l'air comme l'oxygène et l'azote peuvent donc participer à la dégradation et donc la fragilisation de l'adhésif étudié mais ne formeraient à priori pas des sphères rigides dans la matière elle-même. On peut également supposer que les polluants atmosphériques puissent jouer un rôle dans la dégradation voire aussi la migration des additifs rajoutés dans l'adhésif lors de sa fabrication.

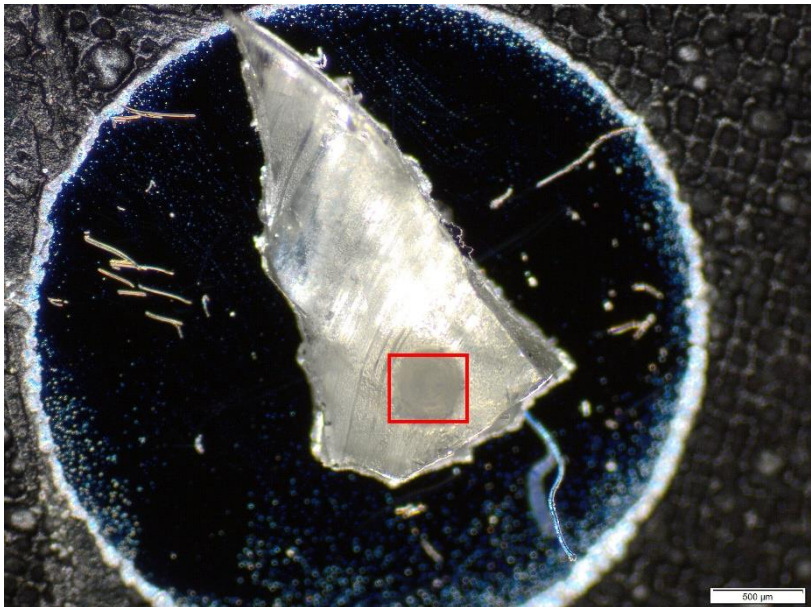
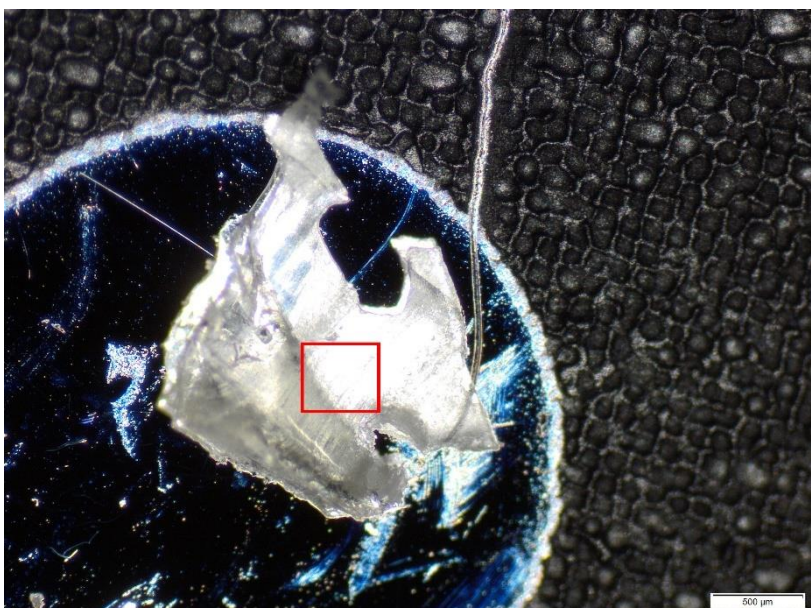
6.3. Analyses FTIR-ATR : Ecran VR201

Les prélèvements et analyses FTIR-ATR * ont été effectués le 27.05.2019 avec Edith Joseph, moi-même et deux représentants du Musée Bolo, Varen Casoli et Romain Borgeaud. L'appareil utilisé est un microscope FTIR *Thermo Scientific Nicolet iN10 MX* et le cristal pour l'ATR était en germanium.

Une fois la bande adhésive enlevée au niveau de la zone à analyser, plusieurs prélèvements ont été effectués et photographiés après avoir été placé sur la plaquette des échantillons (annexe 5, figures 116 et 117, p.111).

¹⁰⁷ ALLEN N.S. EDGE M. and HORIE C.V., 1992, p.29

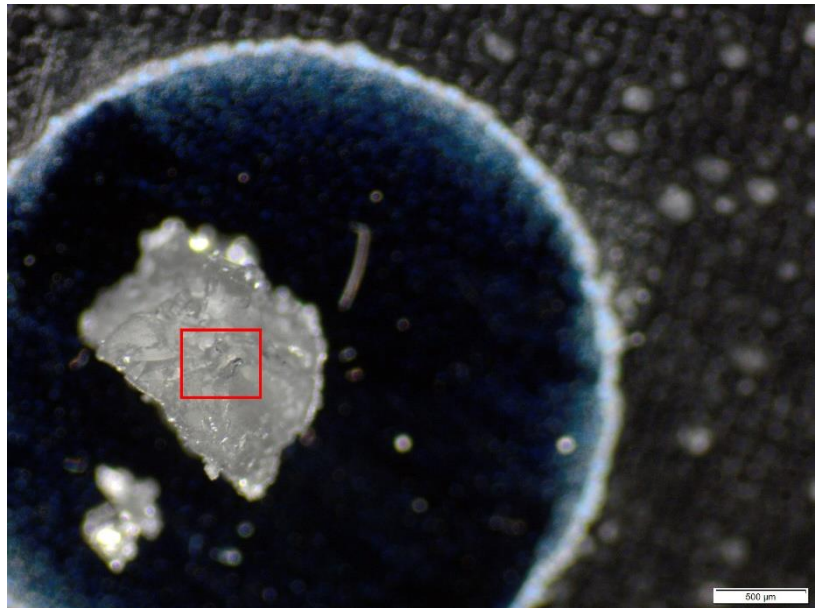
Tableau 5 Prélèvement pour analyses FTIR © HE-Arc, N.Nydegger, 2019

Prélèvement	Zone analysée
VR201_S1 Echantillon d'adhésif avec une sphère (Zone B)	 <i>Figure 39 Echantillon VR201_S1</i> © HE-Arc, 2019
VR201_S2 Echantillon d'adhésif sans sphère (Zone A)	 <i>Figure 40 Echantillon VR201_S2</i> © HE-Arc, 2019

VR201_S3

Grain jaunâtre qui s'effrite et
se trouve en grande quantité
entre une partie de la bande
adhésive et le verre de
l'écran de protection.

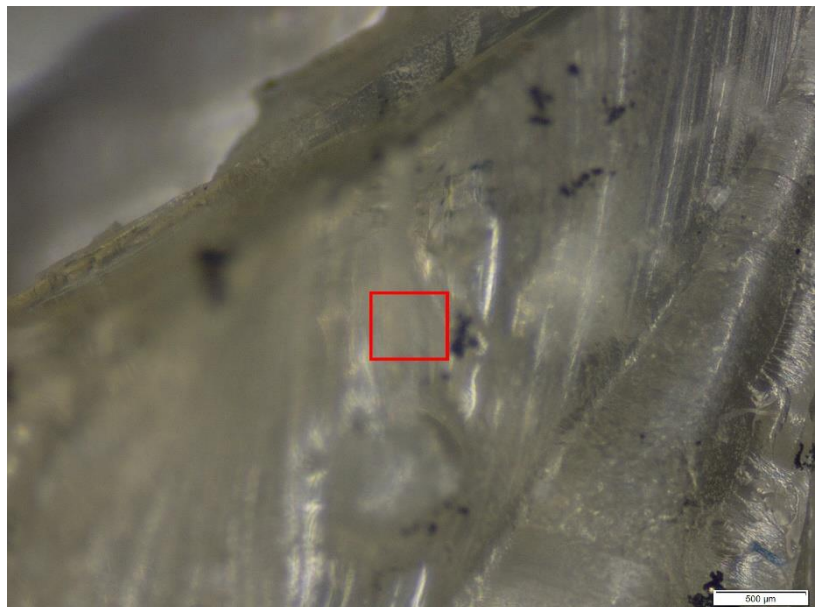
(Zone B)



*Figure 41 Echantillon VR201_S3
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019*

VR201_S4

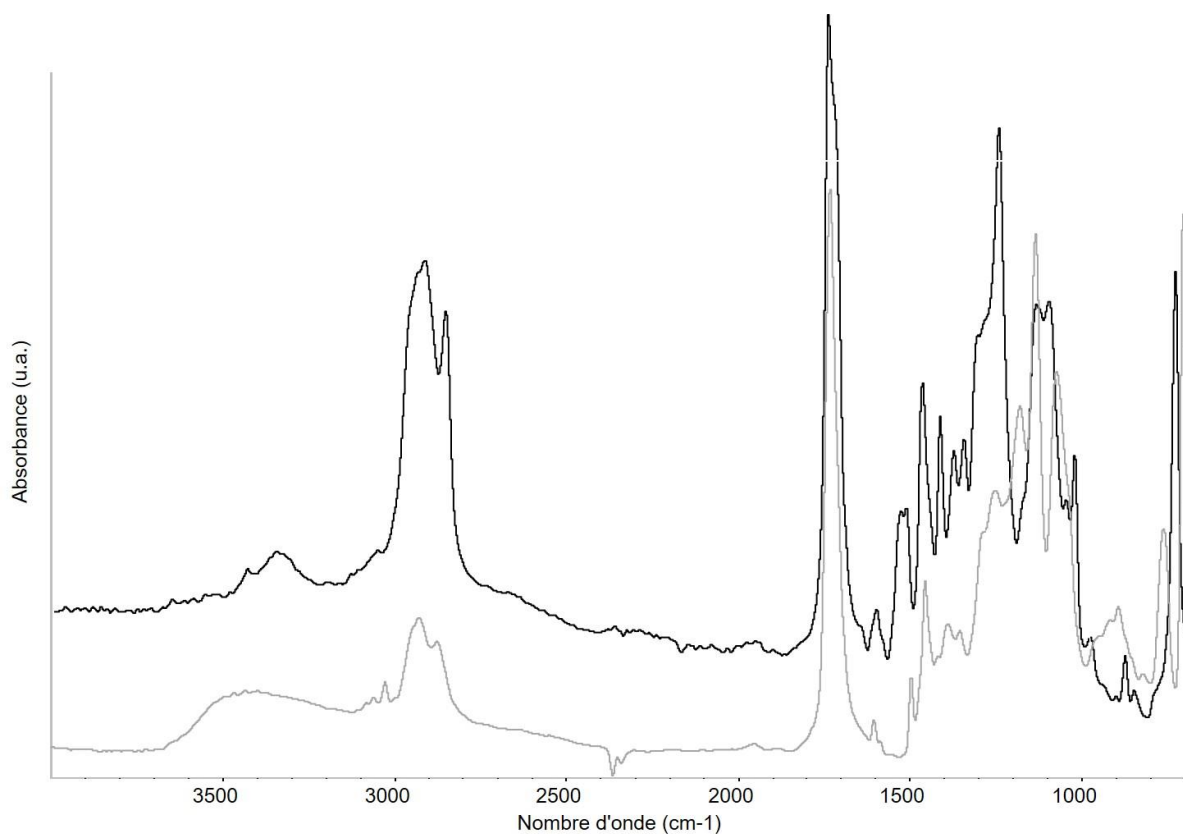
Echantillon
de la bande adhésive
(Zone A)



*Figure 42 Echantillon VR201_S4
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019*

6.3.1. Comparaison du spectre de l'adhésif à un polyuréthane

Selon la zone d'adhésif analysée, deux spectres de nature différente ont été générés. Comme mentionné précédemment il est possible que l'adhésif pourrait être à base de polyuréthane. Nous avons donc comparé le spectre d'un adhésif de polyuréthane avec ceux obtenus : le spectre de la zone A (adhésif ne comprenant pas de sphère) (annexe 5, spectre 3, p.112) est assez similaire à celui-ci (spectre 1, p.40).



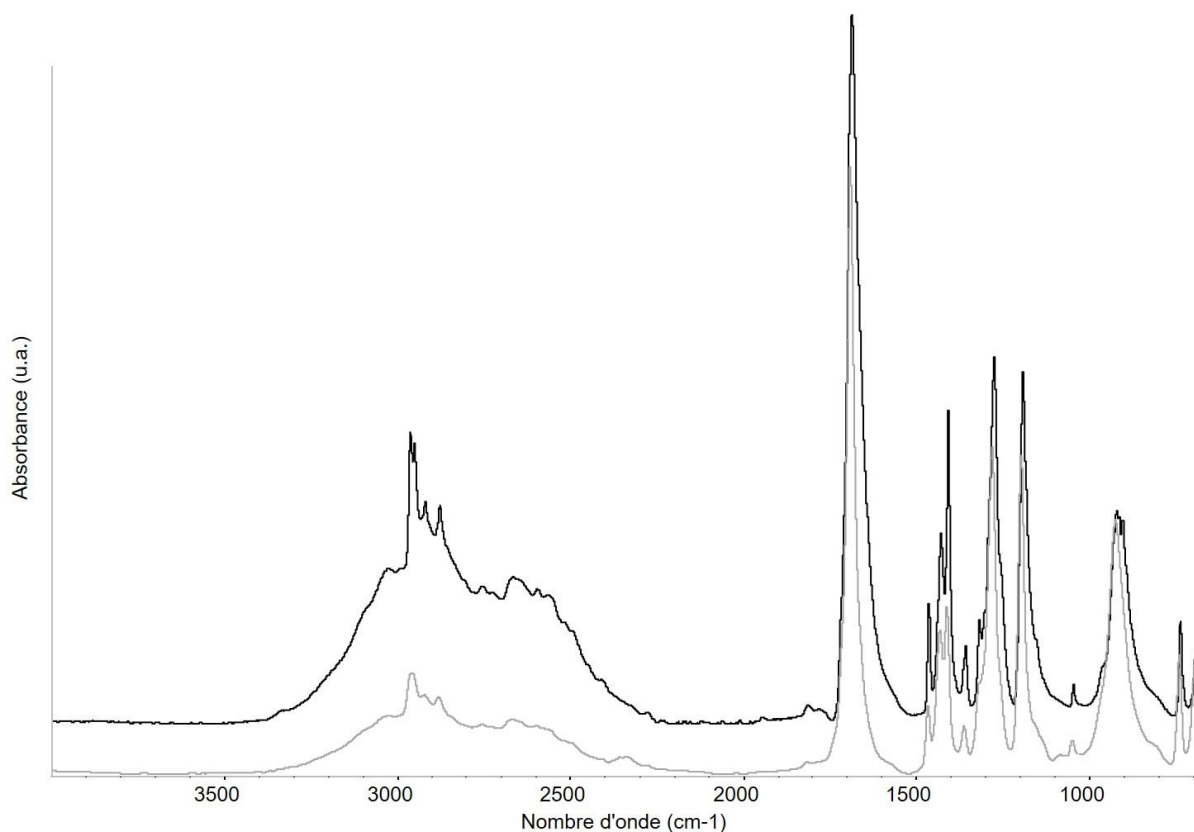
*Spectre 1 FTIR-ATR, comparaison entre le spectre des zones A (gris)
et un adhésif de polyuréthane (noir) © HE-Arc, 2019*

Les pics additionnels observé peuvent provenir de la composition de l'adhésif, notamment au niveau des additifs, qui n'est probablement pas la même mais également à cause de la présence de produit de dégradation. Les produits de dégradations thermique d'adhésif à base de polyuréthane incluent des acides, des esters, des alcools et autres produits en plus petite quantité contenant des groupes fonctionnels carbonyles¹⁰⁸.

¹⁰⁸ Rhodia Operations, 25.04.2012 [en ligne], p.2

6.3.2. Comparaison du spectre des zones altérées

Pour comprendre le spectre des zones B (zone comprenant une sphère) (annexe 5, spectre 4, p.112) des recherches plus approfondies ont été nécessaires car celui-ci ne ressemble pas au spectre de l'adhésif de polyuréthane. Nous avons trouvé une comparaison avec de l'acide adipique (spectre 2, p.41)



*Spectre 2 FTIR-ATR, comparaison entre le spectre des zones B (gris) avec le spectre de l'acide adipique (noir)
© HE-Arc, 2019*

L'acide adipique est un monomère utilisé pour la fabrication de nombreux polymères comme les polyamides, les polyesters, les polyesters polyols et les polyuréthanes¹⁰⁹. C'est un solide cristallin blanc qui peut également être utilisé comme plastifiant¹¹⁰.

Puisque c'est un monomère utilisé lors de la fabrication des polymères, il est possible qu'il s'agisse également d'un produit de dégradation. En effet dans la littérature il est mentionné que l'acide adipique se décomposerait, lors d'hydrolyse, en anhydride adipique, cyclopentane, eau et dioxyde de carbone¹¹¹.

¹⁰⁹ Rhodia Operations, 25.04.2012 [en ligne], p.2

¹¹⁰ CAMEO, 29.04.2016 [en ligne]

¹¹¹ MOROI Gabriela, 12.07.2003 [en ligne], p.488

Les polyuréthanes à base d'acide adipique, dégradés artificiellement par hydrolyse, formeraient un précipité blanc cristallin qui s'avère être de l'acide adipique après analyses¹¹². L'acide adipique est un produit de dégradation des polyesters et ester de polyuréthane notamment, causé par des réactions d'hydrolyse¹¹³.

6.4. Les micro-organismes

Les polymères comme les polyesters aliphatiques, les polyéthers, les polyamides et les polyuréthanes sont sensibles aux attaques de micro-organismes¹¹⁴.

Visuellement l'altération fait penser à une biodégradation à plusieurs professionnels en mycologie et conservation-restauration. De ce fait il est nécessaire de s'assurer qu'il s'agisse oui ou non de micro-organismes car cela influencerait les conditions de conservation et futures interventions.

6.4.1. Tests de bioluminescence

Les tests au Lumitester™ ont été fait sur deux écrans altérés, le VR201 et VT220 (annexe 4, tests de bioluminescence, p.103-104). Les tests de bioluminescence* ne soutiennent pas l'hypothèse de la présence de micro-organismes à l'origine de l'altération étudiée. En effet les résultats obtenus sont très bas : 15 et 23 RLU* pour l'écran du terminal VT220 et 31 et 6 RLU pour l'écran VR201. Dans les normes d'hygiène le seuil maximal est de 200 RLU pour des surfaces lisses et planes et de 500 RLU pour des surfaces non planes¹¹⁵.

Sauf erreur de manipulation, les résultats obtenus indiquent qu'il ne s'agit pas de micro-organismes.

6.4.2. Analyses FTIR-ATR pour détecter la présence de micro-organismes

Les analyses effectuées ne permettent également pas d'attester la présence de micro-organismes dans les échantillons testés. En effet les spectres obtenus auraient présentés des pics d'absorption vibrationnelles correspondants aux lipides, des protéines et des polysaccharides¹¹⁶ (annexe 5, spectre 5, p.113).

¹¹² BALAKIN V.M. and Co. 2016 [en ligne], p.42

¹¹³ Selon entretien avec Yvonne Shashoua

¹¹⁴ DAVIS D.J., STALEY H.B. 1969, p.313

¹¹⁵ HyServe GmbH & Co. KG [en ligne] [consulté le 25.06.2019], p.3

¹¹⁶ DELILLE Anne, 15.11.2007 [en ligne], p. 93-94 et selon entretien avec Edith Joseph

6.4.3. Essais de mise en culture au Laboratoire de Microbiologie de l'Université de Neuchâtel

Les mises en culture effectuées au Laboratoire de Microbiologie de l'Université de Neuchâtel n'ont montré aucune croissance pour des moisissures et des bactéries sur les échantillons prélevés (annexe 5, figures 118-119, p.114).

Une cause de dégradation d'origine biologique est peu probable selon les résultats des tests de bioluminescence, FTIR-ATR et mises en culture. Il s'agirait donc plutôt d'une dégradation intrinsèque à l'adhésif, ayant comme produit de dégradation de l'acide adipique.

6.5. Dissolution d'un échantillon de colle avec des zones altérées

James Scott, professeur et chef de la division santé professionnelle et environnementale de l'université de Toronto, a proposé de tenter de dissoudre l'adhésif à l'aide d'un solvant organique pour savoir s'il était possible de n'obtenir qu'une seule sphère afin de l'observer au microscope. Dans le cas où il s'agit de micro-organismes, il aurait peut-être été possible de l'observer.

Un échantillon a donc été immergé dans de l'acétone pendant une heure environ (annexe 4, choix du solvant organique pour une dissolution, p.105-106). Celui-ci est devenu incolore presque instantanément (figures 43-44, p.44) et les sphères ont une couleur plus bleue-gris alors qu'elles étaient blanches avant. L'adhésif est aussi devenu plus mou et collant mais se détache et se casse plus aisément.

Lorsqu'on essaie d'obtenir un échantillon uniquement d'une sphère, celle-ci redevient incolore et se confond avec le reste de l'adhésif au fur et à mesure que l'acétone s'évapore (figure 45, p.44). On obtient comme une gelée collante et cassante qui s'opacifie légèrement lorsque l'acétone s'évapore.



Figure 43 Echantillon d'adhésif avant dissolution
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019



Figure 44 Echantillon d'adhésif après dissolution
dans de l'acétone © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

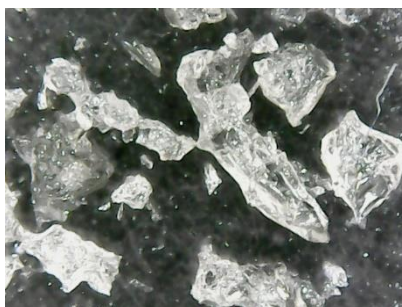


Figure 45 Echantillon d'adhésif qui se désagrége après évaporation de l'acétone © HE-Arc, N. Nydegger

Ce test n'a pas permis d'obtenir une des petites sphères étudiées mais a pu donner des informations sur l'effet de l'acétone sur l'adhésif, information qui pourrait être utile en cas de futurs traitements.

6.6. Le soufre : tests de détection

Un test de détection du soufre a été réalisé pour savoir s'il y avait la présence de composés soufrés dans l'adhésif.

Il y aurait pu y avoir des produits à base de soufre lors de la préparation d'un polyuréthane de type élastomère pour la fabrication de bande adhésive. Les polysulfures sont également utilisés comme produit d'étanchéité¹¹⁷.

D'après les tests effectués, basé sur le protocole de l'ICC¹¹⁸ (annexe 4, test de détection du soufre, p.107-109), l'adhésif de polyuréthane ne dégagerait pas de composé soufré puisque le résultat obtenu est négatif. Le soufre ne semble pas être une cause de la dégradation étudiée cependant la forte odeur dégagée faisait penser à du chlore, indice quant à la présence d'un composé halogéné dans l'adhésif.

6.7. La migration d'adjuvants

Les adjuvants qui sont ajoutés pour améliorer certaines caractéristiques des plastiques peuvent aussi être cause de dégradations involontaires¹¹⁹ (annexe 3, paramètres à prendre en compte lors de la fabrication d'un adhésif, p.99).

La composition et la fabrication des plastiques est essentielle pour comprendre ses dégradations. La liste des additifs pouvant être ajoutés à un plastique est très longue et il n'y en a qu'une petite partie qui sera traitée dans ce chapitre : les retardateurs de flammes halogénés* et les plastifiants. Les stabilisateurs à la chaleur et à la lumière (antioxydants) ainsi que quelques charges sont traités en annexe (annexe 3, les antioxydants et les charges, p.99-100).

Deux définitions ainsi que des photographies d'altérations que l'on retrouve surtout sur des plastiques de type acétate et nitrate de cellulose font penser à celle qui est étudiée sur les écrans cathodiques :

- « **Blistering** : *The surface of the plastic appears to have lots of small bubbles on it where the plastic has physically or chemically distorted in small, localised areas. Trapped gases or localised heating produced by the degrading plastics might also cause blistering.* »¹²⁰ (figure 46, p.46)

¹¹⁷ COMYN John. 1997, p.24

¹¹⁸ ICC, 27.11.2017 [en ligne]

¹¹⁹ MYER Ezrin, 1996, p.21

¹²⁰ QUYE Anita, WILLIAMSON Colin, 1999, p.112

Traduction :

Cloque : La surface du plastique semble avoir beaucoup de petites bulles là où le plastique s'est déformé physiquement ou chimiquement en petites zones localisées. Des gaz piégés ou un chauffage localisé sur un plastique se dégradant peut aussi causer l'apparition de cloques.

- « **Bloom** : Powders or crystal-like growths that appear on the surface of plastics are called blooms. These are often additives, such as fire retardants, stabilisers or plasticiser, that have migrated to the outside of the plastic and are solid at room temperature (compare to Weeping). *Crazing and blistering might give the appearance of a bloom, but cannot be gently brushed or rubbed off.* »¹²¹ (figure 47, p.46)

Traduction :

Fleur/floraison : Croissances similaires à de la poudre ou à un cristal qui apparaissent sur la surface du plastique sont appelées fleur/floraison. Ce sont souvent des additifs comme les retardateurs de flamme, les stabilisants ou plastifiants qui ont migrés à l'extérieur du plastique et qui sont solides à température ambiante (comparé au suintement). Les craquelures ou les cloques peuvent avoir l'apparence d'une fleur/floraison mais ne peuvent pas être délicatement brossés ou frottés.



Figure 46 Blistering © QUYE Anita, WILLIAMSON Colin, 1999, p.112



Figure 47 Bloom © QUYE Anita, WILLIAMSON Colin, 1999, p.113

Lors de la production d'un plastique tout additif peut provoquer des défaillances qui peuvent survenir parfois plusieurs mois après la fabrication du produit s'il n'a pas été bien réparti dans la matière¹²².

¹²¹ QUYE Anita, WILLIAMSON Colin, 1999, p.112

¹²² MYER Ezrin, 1996, p.28

6.7.1. Les retardateurs de flammes halogénés et le test de Beilstein

Il est probable que l'adhésif utilisé soit complété de retardateurs de flammes halogénés.

Les quatre halogènes iode (I), brome (Br), chlore (Cl) et fluor (F) sont efficaces mais ne sont pas tous utilisés¹²³. En effet l'iode n'est pas assez stable et le fluor est trop stables lorsqu'ils sont exposés à de hautes températures¹²⁴. Ainsi ne sont utilisés principalement que les composés organochlorés et organobromés¹²⁵. Lorsque ces produits sont amenés à haute température, de l'acide bromhydrique (HBr) et de l'acide chlorhydrique (HCL) peuvent être formés¹²⁶. Les PBDE¹²⁷ sont des retardateurs de flammes dit « additifs » qui ne sont pas liés chimiquement au matériau de base et qui peuvent être rejetés¹²⁸. Ils sont utilisés notamment pour des mousses de polyuréthane et divers équipements électroniques et électroménagers dont les téléviseurs¹²⁹.

Il est alors possible que, sous certaines conditions, un retardateur de flamme puisse se défaire de la matière de base et éventuellement former des cristaux car cela ressemble à première vue à ce que l'on appelle une efflorescence* et également une cloque ou floraison comme expliqué précédemment. Les retardateurs de flammes bromés sont également sensibles à la photodégradation¹³⁰.

Les retardateurs de flammes chlorés doivent être utilisés en plus grande quantité que les bromés pour obtenir une efficacité similaire¹³¹. Une surdose ou une mauvaise répartition de l'additif pourrait aussi jouer un rôle dans l'altération étudiée.

Un test de Beilstein a permis (annexe 4, test de Beilstein, p.109-110) de confirmer la présence de composés halogénés : chlore, brome ou iode¹³². Cela soutiendrait la présence d'un composé halogéné utilisé comme retardateur de flammes (ou autre additif). En revanche il ne sera pas possible de distinguer les composés bromés des composés chlorés à l'aide de simples tests¹³³. La forte odeur faisant penser à du chlore lors des tests de détection du soufre peuvent soutenir l'hypothèse de la présence de chlore, qui peut également être utilisé dans d'autres types d'additifs comme certaines charges.

¹²³ MEBARKI Benaoumeur, juin 2015 [en ligne], p.15

¹²⁴ Ibidem.

¹²⁵ Ibidem.

¹²⁶ Ibidem.

¹²⁷ Polybromodiphényléthers

¹²⁸ LAOUEDJ Nadjia, 26.06.2019 [en ligne], p.18

¹²⁹ Ibidem.

¹³⁰ KHALED Amina, 15.01.2019 [en ligne], p.13

¹³¹ LAACHACHI Abdelghani, 18.05.2005 [en ligne], p.27

¹³² Oxford Reference, 2019 [en ligne]

¹³³ Selon entretien avec Alexis Domjan

6.7.2. Les plastifiants

Les plastifiants peuvent migrer à la surface des objets et former ce qu'on appelle une exsudation* ou un suintement. S'il y a une substance huileuse à la surface, alors il est presque sûr qu'il s'agit d'un plastifiant¹³⁴. Les polyuréthanes contiennent souvent des plastifiants à base de phtalates* et ils peuvent donc migrer en surface¹³⁵. Comme mentionné précédemment, l'acide adipique a aussi pu être utilisé comme plastifiant.

L'adhésif et les sphères observés n'avaient pas un aspect huileux au début des observations. Nous avons également retrouvé, dans une des réserves du Musée Bolo et sur la fin du travail de diplôme, un autre écran VR201 bien plus altéré. Celui-ci a une altération un peu similaire mais beaucoup plus étendue, des zones plus hétérogènes et on observe comme des coulures (annexe 6, tableau 15, p.127-133). Une substance huileuse provient de l'objet et a coulé sur l'étagère sur laquelle il reposait.

Au bout de 6 semaines de travail en atelier le VR201 a présenté un aspect huileux au niveau des zones où nous avons enlevé la bande adhésive pour les prélèvements et analyses (figure 48, p.48). Nous avons tenté d'absorber un peu de cette substance sur un coton-tige qui s'est très légèrement coloré en jaune (figure 49, p.48).



Figure 48 VR201 qui a commencé à suinter au bout de 6 semaines © HE-Arc, N. Nydegger, 2019



Figure 49 En haut, coton-tige témoin en bas, celui utilisé pour absorber un peu du liquide © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

Cela suggère que l'altération peut donc provenir en partie des plastifiants mais aussi que l'exposition à l'atmosphère a un rôle important dans le processus de dégradation. En atelier les variations thermo-hygrométriques doivent être conséquentes.

Il s'agit peut-être d'un état de dégradation plus avancé avec un suintement du plastifiant et d'une migration provenant du plastifiant lui-même ou d'un autre additif.

¹³⁴ QUYE Anita, WILLIAMSON Colin, 1999 et selon entretien avec Yvonne Shashoua

¹³⁵ Selon entretien avec Yvonne Shashoua

7. Synthèse des résultats

Les analyses et tests effectués ont servis d'abord à identifier l'adhésif altéré, ensuite à essayer de déterminer s'il y avait la présence de micro-organismes puis à formuler d'autres hypothèses de dégradation en vue des résultats négatifs obtenus concernant une biodégradation. Le tableau ci-dessous résume les résultats obtenus d'après les analyses et les tests.

Tableau 6 Résultats des tests et analyses © HE-Arc, N. Nydegger

Test	Résultat
FTIR-ATR : Identification de l'adhésif	Comparaison plausible avec un adhésif à base de polyuréthane
FTIR-ATR : Identification de l'altération	Comparaison de la zone altérée (sphères) très proche de l'acide adipique
Bioluminescence	Négatif
FTIR-ATR : Détection de micro-organismes	Négatif
Mise en culture au laboratoire de microbiologie de Neuchâtel	Négatif
Dissolution d'un échantillon dans de l'acétone	Dissolution de l'adhésif très difficile, la matière devient gluante et collante et se défait lorsque l'acétone s'évapore
Tests de détection du soufre	Négatif
Tests de mesure de l'acidité	pH d'un échantillon d'adhésif chauffé dans de l'eau distillée : 3-4
Test de Beilstein (composés halogénés)	Positif

En annexe se trouve un tableau résumant toutes les hypothèses avec les arguments favorables et défavorables (annexe 7, tableau 16, p.137-141).

Les hypothèses les plus probables en fonction de tous les résultats obtenus se basent sur la dégradation de l'adhésif avec comme produit de dégradation de l'acide adipique et la migration d'un plastifiant. Ces deux phénomènes, l'apparition de formes cristallines blanches et le suintement d'un produit huileux, sont peut-être liés. Les causes principales de cette dégradation pourraient être : la thermo dégradation, l'hydrolyse et l'oxydation.

La thermo dégradation a pu déjà survenir dès la fabrication de l'objet mais également pendant son utilisation. L'hydrolyse et l'oxydation par le dioxyde de l'air peuvent avoir un rôle important dans la dégradation. Si la cause provient de la pollution atmosphérique ou de l'humidité, cela expliquerait pourquoi les côtés des écrans s'altèrent en premier et de façon plus conséquente. De plus après 6 semaines où l'écran VR201 a été amené en atelier l'adhésif a commencé à suinter, témoignant d'une dégradation active et peut-être fortement liée aux conditions de conservation (température et humidité relative principalement).

Partie IV

Préconisations de conservation

La quatrième partie concerne les préconisations de conservation au niveau des conditions de conservation, du stockage et de la manipulation d'écrans cathodiques.

8. Préconisations de conservation

8.1. Les conditions de conservation

Il est nécessaire de prendre en compte les matériaux principaux des écrans cathodiques : le plastique, le métal et le verre. En croisant les conditions de conservation de ces trois matériaux il est possible de trouver un compromis présenté dans le tableau ci-dessous. Il est nécessaire de satisfaire en premier lieu les meilleures conditions de conservation possibles pour les polymères qui sont moins stables.

Tableau 7 Conditions de conservation croisées, adaptée aux écrans cathodiques © HE-Arc, N. Nydegger

Matériau	Température (°C)	Humidité relative (%)	Lumière
Polymère	20 ou moins ¹³⁶	30-50 ¹³⁷	75 µW / lumen* et 50 lux* maximum ¹³⁸
Métal	19-23 ¹³⁹	35-55 ¹⁴⁰	-
Verre	Eviter les fluctuations trop élevées ¹⁴¹	40-60 ¹⁴²	Eviter l'exposition à la lumière du soleil ou autre source de rayons UV ¹⁴³
Compromis	10-20	35-50	75 µW / lumen et 50 lux maximum

Avec les données du tableau croisé on obtient des conditions de conservation atteignables : une température entre 10 et 20°C, une humidité relative entre 35 et 50% et éviter l'exposition à la lumière, sinon préféré une limite de 75 µW / lumen et 50 lux. L'important reste de maintenir une température et une humidité relative stable¹⁴⁴ sur le long terme. Comme expliqué précédemment, la formation du produit de dégradation d'acide adipique serait causée par des réactions d'hydrolyse, nous indiquant qu'il

¹³⁶ QUYE Anita, WILLIAMSON Colin, 1999, p.92

¹³⁷ Ibidem.2

¹³⁸ Ibidem.

¹³⁹ BARCLAY L. Robert & Co, 2018 [en ligne]

¹⁴⁰ LOGAN Judy, 2007 [en ligne]

¹⁴¹ NEWTON Charlotte et LOGAN Judy, 2007 [en ligne]

¹⁴² Ibidem.

¹⁴³ Ibidem.

¹⁴⁴ QUYE Anita, WILLIAMSON Colin, 1999, p.87

est impératif de préconiser une humidité relative basse pour le stockage de ces objets¹⁴⁵. Afin de retarder une dégradation active il est possible de conserver certains plastiques entre 5 et 10°C car cela ralentir fortement les réactions chimiques d'hydrolyse et d'oxydation¹⁴⁶ qui peuvent avoir un rôle important dans la dégradation des adhésifs des écrans cathodiques altérés.

8.2. Le stockage et la manipulation

Pour stocker ou exposer des écrans cathodiques il est recommandé de ne pas les exposer à la lumière du soleil, à la lumière et à la chaleur artificielle et éviter de les placer proches des fenêtres¹⁴⁷. Éviter de stocker des objets en plastique dans des caisses ou lieu clôt, il faut une certaine ventilation pour éviter une forte concentration de polluants dans l'air pouvant provenir des plastiques en dégradation¹⁴⁸.

S'il y a une volonté d'utiliser des tissus en coton ou des cartons il est préférable d'utiliser des modèles non-acides et incolores¹⁴⁹. Les objets en plastique de façon générale ne devraient pas se toucher les uns les autres pour éviter que la dégradation des uns n'altère les autres¹⁵⁰. En cas de suspicion de dégagement de polluant par la dégradation des objets, du charbon actif peut être utilisé pour absorber les molécules indésirées pouvant induire des réactions chimiques à la surface des objets¹⁵¹.

Concernant la manipulation, éviter de toucher ou bouger un objet si ce n'est pas nécessaire et porter des gants propres, de préférence en coton non pelucheux¹⁵².

Les objets en plastiques sont imprévisibles en termes de dégradation et nécessitent d'être surveiller régulièrement. Cela commence par une inspection visuelle de la surface du matériau tout en gardant en tête les différents agents de dégradations et documenter tout changement d'aspect¹⁵³.

Un conservateur-restaurateur qualifié serait à même d'entreprendre un remplacement de l'adhésif si cela est jugé nécessaire. Une telle intervention pourrait être justifiée en vue de l'état de certains écrans et du fait que la dégradation de l'adhésif soit rapide et induise l'altération de plusieurs parties métalliques. Celles-ci pourraient à terme se casser s'il n'y a aucune prise en charge.

¹⁴⁵ Selon entretien avec Yvonne Shashoua

¹⁴⁶ SHASHOUA Yvonne, 2008, p.14

¹⁴⁷ QUYE Anita, WILLIAMSON Colin, 1999, p.87

¹⁴⁸ Ibidem.

¹⁴⁹ Ibidem.

¹⁵⁰ Ibidem.

¹⁵¹ SHASHOUA Yvonne, 2008, p.13

¹⁵² QUYE Anita, WILLIAMSON Colin, 1999, p.88

¹⁵³ SHASHOUA Yvonne, 31.01.2012 [en ligne], p.219

Conclusion

L'étude de la *cataracte* des écrans à tube cathodique a permis de constater qu'il ne s'agit pas d'une biodégradation mais plutôt d'une dégradation intrinsèque aux objets. Les résultats des tests et analyses soutiennent le fait qu'il s'agit d'une dégradation de l'adhésif, qui est à base de polyuréthane.

Les formes cristallines blanches observées pourraient être un produit de dégradation de l'adhésif couplé à la migration d'un additif. En effet les exsudations observées sont un signe soutenant l'hypothèse d'un plastifiant qui migrerait en surface. Les causes d'une dégradation intrinsèque peuvent être dû à la thermo dégradation, la photodégradation et surtout l'hydrolyse et l'oxydation.

La dégradation semble active à la vue de l'apparition d'exsudation en moins de deux mois. Ceci pourrait s'expliquer par les variations thermo-hygrométriques en atelier et du fait qu'une partie de la bande adhésive autour de l'écran a été enlevé pour faire les prélèvements, exposant encore plus l'objet à l'air ambiant.

Plusieurs autres modèles d'écrans présentent une altération similaire mais de façon plus ou moins importante. Ces modèles sont tous des années 80 et certains, même plus anciens, sont en très bon état. Cela pourrait s'expliquer par le fait que les usinages peuvent être différents et qu'il y aurait des compositions d'adhésif et d'additifs qui varient à cause de mauvais mélanges des monomères.

Les conditions de conservation semblent également jouer un rôle crucial. Le modèle le plus poussiéreux était le plus altéré, laissant penser que les facteurs environnementaux et surtout l'humidité accélérerait le processus de dégradation par hydrolyse, du fait des caractéristiques hygroscopiques de la poussière.

L'étude effectuée est un premier pas dans la tentative de compréhension de la *cataracte* des écrans cathodique et il reste encore beaucoup de questions sans réponses. Nous sommes presque sûr qu'il ne s'agit pas d'une biodégradation mais nous ne pouvons pas éliminer l'hypothèse. Une dégradation de l'adhésif et/ou une migration des additifs semble tout à fait plausible. Nous ne savons pas si le processus de dégradation formant les sphères d'aspect cristallin est lié à l'exsudation observée. D'autres recherches seraient alors nécessaires pour comprendre cette altération, de plus nous ne savons rien non plus quant à une potentielle toxicité qui pourrait provenir des processus de dégradation.

Une surveillance et une documentation régulière de l'état de conservation des écrans cathodiques mais aussi d'autres objets de type informatique permettraient de mieux comprendre leurs dégradations et, à terme, de pouvoir opter pour les meilleures conditions de conservation et interventions.

Références et listes d'illustrations

Bibliographie

American Chemistry Council, février 2008 [en ligne] :

Polyuréthanes et dégradation thermique [en ligne]. Bulletin technique ; center for the polyurethanes industry. American Chemistry Council, février 2008 :

<https://polyurethane.americanchemistry.com/Resources-and-Document-Library/6937.pdf>

ALLEN N.S. EDGE M. and HORIE C.V., 1992:

ALLEN N.S. EDGE M. and HORIE C.V. *Polymers in conservation*. Special Publication No. 105. The Royal Society of Chemistry, Cambridge, 1992.

BALAKIN V.M. and Co. 2016 [en ligne] :

BALAKIN V.M. and Co. *The structure and properties of the degradation products of diethylenetriamine polyurethane based on 1,5-naphthylene diisocyanate* [en ligne]. In *International Polymer Science and Technology*, Vol. 44, No.4, 2016 [consulté le 12.07.2019] :

<http://www.polymerjournals.com/pdfdownload/1271815.pdf>

BARCLAY L. Robert & Co, 2018 [en ligne] :

BARCLAY L. Robert & Co. *Caring for metal objects* [en ligne]. Gouvernement du Canada. ICC, 2018 [consulté le 05.07.2019] : <https://www.canada.ca/en/conservation-institute/services/preventive-conservation/guidelines-collections/metal-objects.html#a4e>

BERGERON André et NAUD Colette, 16.06.2016 [en ligne] :

BERGERON André et NAUD Colette. *L'humidité relative et la température* [en ligne]. 1995 (Révision 2011). In *Centre de conservation Québec*, 16.06.2016 [en ligne]. Gouvernement du Québec, 2019 [consulté le 24.06.2019] : <https://www.ccq.gouv.qc.ca/index.php?id=171>

BESSION Nathalie, 1996-1997 [en ligne] :

BESSION Nathalie. *Rapport de recherche bibliographique : Amélioration des propriétés des polyuréthanes par l'ajout de charges* [en ligne]. INSA. E.N.S.S.I.B, 1996-1997 [consulté le 01.07.2019] : <https://www.enssib.fr/bibliotheque-numerique/documents/61542-amelioration-des-proprietes-des-polyurethanes-par-l-ajout-des-charges.pdf>

BOUDET Alain, 2003 :

BOUDET Alain. *Voyage au cœur de la matière plastique : les microstructures des polymères*. CNRS Editions, 2003, Paris.

CAMEO, 29.04.2016 [en ligne] :

Adipic acid [en ligne]. CAMEO, 29.04.2016 [consulté le 04.07.2019] :

http://cameo.mfa.org/wiki/Adipic_acid

Centre de conservation Québec (1), 2019 [en ligne] :

Efflorescence [en ligne]. Centre de conservation Québec. Gouvernement du Québec, 2019 [consulté le 26.06.2019] :

https://www.ccg.gouv.qc.ca/index.php?id=104&no_cache=1&tx_mcccfrechercheavancee_pi1%5Bress_uid%5D=178

Centre de conservation Québec (2), 2019 [en ligne] :

Exsudation [en ligne]. Centre de conservation Québec. Gouvernement du Québec, 2019 [consulté le 27.06.2019] :

http://www.ccg.gouv.qc.ca/index.php?id=104&tx_mcccfrechercheavancee_pi1%5Bress_uid%5D=189

Cern Document Server, 05.07.2017 [en ligne] :

Exhibition Objects [en ligne]. CERN Document Server, 05.07.2017 [consulté le 23.05.2019] :

<https://cds.cern.ch/record/2273289?ln=fr>

Ciba [consulté le 27.06.2019] [en ligne] :

Additives for Polyuréthane ; Enhanced Processing and Service Life for Polyurethane Products [en ligne].

Ciba. Ciba Speciality Chemicals [consulté le 27.06.2019] :

http://www.mufong.com.tw/ciba/ciba_guid/additives_polyurethane.pdf

CIGREF, 2016 [en ligne] :

Histoire des premiers écrans aux écrans tactiles [en ligne]. CIGREF, réussir le numérique. CIGREF, 2016 [consulté le 20.05.2019] :

<http://www.histoire-cigref.org/blog/histoire-des-premiers-ecrans-aux-ecrans-tactiles/>

COMYN John, 1997 :

COMYN John. *Adhesion Science*. The Royal Society of Chemistry, Cambridge, 1997. RSC Paperbacks.

Collection Council of Australia, 2009 [en ligne] :

Significance 2.0, a guide to assessing the significance of collections [en ligne]. Collection Council of Australia Ltd, 2009 [consulté le 25.09.2018] : <http://pandora.nla.gov.au/pan/112443/20101122-1236/significance.collectionscouncil.com.au/part5-significancecriteria.html>

Comment c'est fait, 04.07.2014 [en ligne] :

Comment c'est fait - Les Tubes Cathodiques. In Wayback Machine ; Internet Archive [en ligne]. 31.12.2014 [consulté le 22.05.2019] : <https://web.archive.org/web/20140704111224/http://www.commentcestfait.com/>

CUCCI Costanza and Co. 31.01.2012 [en ligne] :

CUCCI Costanza and Co. *Chemical composition/structural characterisation using spectroscopic techniques* [en ligne]. 31.01.2012. In « Identification and characterisation of plastics artefacts ; Spectroscopique techniques ». POPART [consulté le 24.06.2019] : http://popart-highlights.mnhn.fr/wp-content/uploads/2_Identification/Chemical_composition-structural_characterisation/2_3_ChemicalComposition.pdf

DAVIS D.J., STALEY H.B. 1969 :

DAVIS D.J., STALEY H.B. *Analytical Chemistry of the Polyurethanes*. Volume XVI, Part III. John Wiley & Sons, 1969.

DEC, 1986 [en ligne] :

VT220 ; Pocket Service Guide [en ligne]. 3rd Edition. Digital Equipment Corporation, VT100.net. DEC, U.S.A, 1986 [consulté le 02.07.2019] : <https://amaus.net/static/S100/DEC/terminal/DEC%20VT220%20Pocket%20Services%20Guide.pdf>

DeVere Chuck, 1967 :

DeVERE Chuck. *Cathode-Ray Tubes*. 2ème édition. Tektronix, Oregon, 1967. Circuit Concepts.

DELILLE Anne, 15.11.2007 [en ligne] :

DELILLE Anne. *Etude in situ, par spectroscopie infrarouge en mode ATR, des premières étapes de la formation d'un biofilm de Pseudomonas fluorescens et de sa réponse aux variations de la quantité de carbone organique dissous : application à la détection précoce du changement de la qualité microbiologique d'une eau de distribution* [en ligne]. CNRS. Nancy-Université, Faculté des sciences et techniques, 15.11.2017 [consulté le 25.06.2019] : http://docnum.univ-lorraine.fr/public/SCD_T_2007_0119_DELILLE.pdf

Développez-com, 2000-2019 [en ligne] :

Historique du langage C [en ligne]. Développez-com, 2000-2019 [consulté le 27.06.2019] :

<https://c.developpez.com/cours/historique-langage-c/>

Digital, 05.1982 [en ligne] :

Field Maintenance Print Set. Digital, In Internet Archive [en ligne]. 05.1982 [consulté le 23.05.2019]

https://archive.org/details/bitsavers_decterninchematicMay82_1311545

Encyclopaedia Britannica, 2019 [en ligne] :

Hydrolysis, Chemical Reaction [en ligne]. Encyclopaedia Britannica, 2019 [consulté le 29.09.2019] :

<https://www.britannica.com/science/hydrolysis>

Encyclopaedia Universalis France, 2019 (2) :

Bakélite [en ligne]. Encyclopaedia Universalis France, 2019 [consulté le 22.05.2019] :

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/bakelite/>

Encyclopaedia Universalis France, 2019 (1) :

HERTZ Heinrich Rudolf (1857-1894) [en ligne]. Encyclopaedia Universalis France, 2019 [consulté le

20.05.2019] : <https://www.universalis.fr/encyclopedie/heinrich-rudolph-hertz/>

Encyclopaedia Universalis France, 2019 (3) :

Oligomère [en ligne]. Encyclopaedia Universalis France, 2019 [consulté le 07.07.2019] :

<https://www.universalis.fr/dictionnaire/oligomere/>

Expert tv vidéo [en ligne] :

Tout savoir sur les Tubes Cathodiques [en ligne]. Expert tv vidéo ; Redonnez vie à vos téléviseurs

[consulté le 23.05.2019] : <http://www.experttvvideo.com/cathode.html>

FOULC Marie-Pierre, ALCORTA José [en ligne]. 05.08.2008 :

FOULC Marie-Pierre, ALCORTA José. *Durabilité des assemblages par colles : Etat de l'Art. (Mosule Ma5) ;*

Note Scientifique & Technique de Synthèse [en ligne]. Les Entretiens de Toulouse ; Rencontres

Aérospatiales. CEA Le Ripault, 05.08.2008 [consulté le 19.06.2019] :

<https://rescoll.fr/wp-content/uploads/2012/03/durabilite-des-assemblages-colles.pdf>

Gouvernement du Québec, 2019 [en ligne] :

L'humidité relative et la température [en ligne]. Centre de conservation Québec. Gouvernement du

Québec, 2019 [consulté le 07.07.2019] :

https://www.ccq.gouv.qc.ca/index.php?id=171&id=171&type=0&no_cache=1

Gralon, 08.04.2008 [en ligne] :

Le Circuit Imprimé : Histoire D'une Invention [en ligne]. Gralon, 08.04.2008 [consulté le 26.05.2019] :
<https://www.gralon.net/articles/materiel-et-consommables/materiels-industriels/article-le-circuit-imprime---histoire-d-une-invention-1453.htm>

HEPBURN Claude, 1992 :

HEPBURN Claude. *Polyurethane elastomers*. Second Edition. Elsevier Applied Science, New York, 1992

HORIE Charles Velson, 1987 :

HORIE Charles Velson. *Materials for conservation : organic consolidants, adhesives and coatings*. Butterworth-Heinemann Series in Conservation and Museology, London, 1987

ICC, 27.11.2017 [en ligne] :

Comment déceler la présence de soufre dans les matériaux à l'aide d'un papier réactif à l'acétate de plomb – Notes de l'Institut canadien de conservation 17/5 [en ligne]. Gouvernement du Canada, 2017.
ICC, 27.11.2017 [consulté le 25.06.2019] :
<https://www.canada.ca/fr/institut-conservation/services/publications-conservation-preservation/notes-institut-canadien-conservation/deceler-presence-soufre-papier-acetate.html>

ICC, 03.05.2019 [en ligne] :

La préservation des objets en caoutchouc ou en plastique – Notes de l'Institut canadien de conservation (ICC) 15/1 [en ligne]. Gouvernement du Canada. Patrimoine canadien, 1997. ICC, 03.05.2019 [consulté le 27.06.2019] :
<https://www.canada.ca/fr/institut-conservation/services/publications-conservation-preservation/notes-institut-canadien-conservation/preservation-caoutchouc-plastique.html>

ICC, 22.02.2019 [en ligne] :

Le test de Beilstein – Une méthode simple pour déceler la présence de chlore dans les matériaux organiques et polymériques et quelques exemples de matériaux testés – Notes de l'Institut canadien de conservation (ICC) 17/1. Gouvernement du Canada, 1993. ICC, 22.02.2019 [consulté le 04.07.2019] :
<https://www.canada.ca/fr/institut-conservation/services/publications-conservation-preservation/notes-institut-canadien-conservation/test-beilstein-materiaux-organiques-polymeriques.html>

INRS, 2017 [en ligne] :

Dégradation thermique des plastiques : une nouvelle base de données INRS [en ligne]. INRS, Santé et sécurité au travail. INRS 2017 [consulté le 21.06.2019] :
<http://www.inrs.fr/actualites/base-donnees-degradation-thermique-plastiques.html>

INRS, mars 2011 [en ligne] :

Les écrans à tubes cathodiques ; Comment réduire le risque chimique. 1^{ère} Edition. INRS, mars 2011.

In INRS Santé et Sécurité au travail [en ligne]. INRS 2017 [consulté le 11.06.2019] :

<http://www.inrs.fr/header/presse/cp-eco-systemes-risque-ecran-cathodique.html>

INRS, avril 2019 [en ligne] :

Les additifs [1-3] [en ligne]. Version 2. INRS, Santé et sécurité au travail. INRS 2019 [consulté le 01.07.2019] :

http://www.inrs.fr/dms/plastiques/DocumentCompagnonPlastiques/PLASTIQUES_DocCompagnon_11-1/3%20Additifs%20avril%202019.pdf

Isticktoit.net, 26.09.2016 [en ligne] :

Back to the future : using a DEC VT220 from 1983 [en ligne]. Isticktoit.net, 26.09.2016 [consulté le 23.05.2019] : <https://www.isticktoit.net/?p=1728>

J. LICARI James, W. SWANSON Dale, 2005 [en ligne] :

J. LICARI James, W. SWANSON Dale. *Adhesives Technology for Electronic Applications*. William Andrew, 2005. *In* Polyurethane Adhesives [en ligne]. ScienceDirect, ESLEVIER 2019 [consulté le 13.06.2019] :

<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/polyurethane-adhesive>

J. NAGLE Dylan and Co. 08.2007 [en ligne] :

J. NAGLE Dylan and Co. *Infrared microspectroscopic study of the thermo-oxydative degradation of hydroxy-terminated polybutadiène/isophorone diisocyanate polyurethane rubber* [en ligne]. Polymer Degradation and Stability, Volume 92, 08.2007. *In* Science Direct, Elsevier 2019 [consulté le 04.07.2019] : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014139100700167X>

KHALED Amina, 15.01.2019 [en ligne] :

KHALED Amina. *Photodégradation des retardateurs de flamme bromés dans des matériaux textiles et plastiques*. Université Clairemont Auvergne, France, 02.10.2018. *In* HAL archives ouvertes [en ligne]. 15.01.2019 [consulté le 04.07.2019] : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01981939/document>

LAOUEDJ Nadja, 26.06.2019 [en ligne] :

LAOUEDJ Nadja. *Caractérisation spectroscopique et thermique du système ABS/Retardateurs de flamme bromés. Applicatio à la photolyse.* [en ligne]. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 26.06.2014 [consulté le 26.06.2019] :

http://www.univ-usto.dz/theses_en_ligne/doc_num.php?explnum_id=2647

LAACHACHI Abdelghani, 18.05.2005 [en ligne] :

LAACHACHI Abdelghani. *Polyméthacrylate de méthyle (PMMA) : Développement de nouveaux systèmes retardateurs de flammes à base de nanocharges minérales. Recherches de synergie avec des montmorillonites et des composés phosphorés* [en ligne]. Université de Metz, 18.05.2005 [consulté le 26.06.2019] : <https://phdpolymerandfire.files.wordpress.com/2011/01/abdelghani-laachachi.pdf>

Larousse (1) [consulté le 06.07.2019] [en ligne] :

Anhydride [en ligne]. Larousse [consulté le 06.07.2019] :

<https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/anhydride/3564>

Larousse (2) [consulté le 07.07.2019] [en ligne] :

Amorphe [en ligne]. Larousse [consulté le 07.07.2019] :

<https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/amorphe/3003>

Larousse (3) [consulté le 07.07.2019] [en ligne] :

Déflexion [en ligne]. Larousse [consulté le 07.07.2019] :

<https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/d%C3%A9flexion/22718>

Larousse (4) [consulté le 07.07.2019] [en ligne] :

Implosion [en ligne]. Larousse [consulté le 07.07.2019] :

<https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/implosion/41923>

Larousse (5) [consulté le 07.07.2019] [en ligne] :

Photoélectrique [en ligne]. Larousse [consulté le 07.07.2019] :

<https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/photo%C3%A9lectrique/60435>

LE FLEM Gille, 29.10.2010 [en ligne] :

LE FLEM Gilles. *Les phosphates, matériaux pour l'optique*. 3^{ème} Cycle. Université de Bordeaux, France, 2010. In HAL archives ouvertes [en ligne]. 29.10.2010 [consulté le 04.07.2019] :

<https://cel.archives-ouvertes.fr/cel-00530729/document>

LOGAN Judy, 2007 [en ligne] :

LOGAN Judy. *Mise en réserve des métaux – Notes de l'Institut canadien de conservation (ICC) 9/2* [en ligne]. In Gouvernement du Canada, ICC. Ministre, Travaux publics et Services gouvernementaux Canada, 2007 [consulté le 05.07.2019] :

<https://www.canada.ca/fr/institut-conservation/services/publications-conservation-preservation/notes-institut-canadien-conservation/mise-reserve-metaux.html>

LIPPINCOTT & PETO, 1990 [en ligne] :

LIPPINCOTT & PETO. *Chemical degradation of polyurethane*. Gale Groupe, 1990. In The Free Library [en ligne]. Farlex, 2019 [consulté le 21.06.2019] :

<https://www.thefreelibrary.com/Chemical+degradation+of+polyurethane.-a09000712>

MAIRESSE M & CO. 1999 [en ligne] :

MAIRESSE M & Co. *Produits de dégradation thermique des matières plastiques*. N°174, ND 2097. Cahiers de notes documentaires – Hygiène et sécurité du travail. INRS, 1^{er} trimestre 1999. In INRS Santé et sécurité au travail [en ligne]. INRS 2017 [consulté le 21.06.2019] :

<http://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ND%202097>

Manuel du programmeur Linux, 17.07.2008 [en ligne] :

Console_Codes [en ligne]. Manuel du programmeur Linux, 17.07.2008 [consulté le 27.06.2019] :

http://manpagesfr.free.fr/man/man4/console_codes.4.html

MEBARKI Benaoumeur, juin 2015 [en ligne] :

MEBARKI Benaoumeur. *Comportement spectroscopique et thermique de retardateurs de flamme bromés et d'un thermoplastique sous irradiation UVA* [en ligne]. Faculté des sciences et de la technologie. Université Dr. Moulay Tahar de Saïda, juin 2015 [consulté le 26.06.2019] :

https://pmb.univ-saida.dz/buscopac/doc_num.php?explnum_id=108

MENG Wen and Co., 2016 [en ligne] :

MENG Wen and Co. *The Recycling of leaded Glass in Cathode Ray Tube (CRT)* [en ligne]. ResearchGate. Procedia Environmental Sciences, 2016 [consulté le 20.06.2019] :

https://www.researchgate.net/publication/301745432_The_Recycling_of_Leaded_Glass_in_Cathode_Ray_Tube_CRT

MH Magazine WordPress, 2019 [en ligne] :

Liaisons conjuguées [en ligne]. Physique et Chimie, MH Magazine WordPress, 2019 [consulté le 07.07.2019] : <http://webphysique.fr/liaisons-conjuguees/>

MICHALSKI Stefan, 05.07.2018 [en ligne] :

MICHALSKI Stefan. *Agent de détérioration : Lumière, ultraviolet et infrarouge* [en ligne]. Gouvernement du Canada. ICC, 05.07.2018 [consulté le 24.06.2019] :

<https://www.canada.ca/fr/institut-conservation/services/agents-deterioration/lumiere.html>

MICHALSKI Stefan, 17.05.2018 [en ligne] :

MICHALSKI Stefan. *Agent de détérioration : Température inadéquate* [en ligne]. Gouvernement du Canada. ICC, 17.05.2018 [consulté le 21.06.2019] :

<https://www.canada.ca/fr/institut-conservation/services/agents-deterioration/temperature.html>

MOROI Gabriela, 12.07.2003 [en ligne] :

MOROI Gabriela. *Influence of ion species on the thermal degradation of the polyuréthane interaction products with transition metal ions* [en ligne]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, Volume 71, 2^{ème} édition, 06.2004. In Science Direct, Elsevier 2019 [consulté le 12.07.2019] :

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237003001335>

MYER Ezrin, 1996 :

MYER Ezrin. *Plastics Failure Guide ; Cause and Prevention*. Carl Hanser, New York, 1996

NEWTON Charlotte et LOGAN Judy, 2007 [en ligne] :

NEWTON Charlotte et LOGAN Judy. *Le soin de la céramique et du verre – Notes de l'Institut canadien de conservation (ICC) 5/1* [en ligne]. Gouvernement du Canada. Ministre, Travaux publics et Services gouvernementaux Canada, 2007 [consulté le 05.07.2019] :

<https://www.canada.ca/fr/institut-conservation/services/publications-conservation-preservation/notes-institut-canadien-conservation/soin-ceramique-verre.html>

NGUYEN Marie-Lan, 02.05.2005 [en ligne] :

NGUYEN Marie-Lan. *Brève histoire d'Unix* [en ligne]. 02.05.2005 [consulté le 27.06.2019] :

<https://www.tuteurs.ens.fr/unix/histoire.html>

Oxford Reference, 2019 [en ligne] :

Beilstein's test [en ligne]. Oxford Reference. Oxford University Press, 2019 [consulté le 26.06.2019] :

<https://www.oxfordreference.com/view/10.1093/oi/authority.20110803095456269>

PAPREC GROUP [en ligne] :

La fabrication des polymères et matières plastiques [en ligne]. PAPREC GROUP [consulté le 28.05.2019] :

<https://www.paprec.com/fr/comprendre-recyclage/recyclage-plastique/fabrication-polymeres-matieres-plastiques>

PCB solutions, 2017 [en ligne] :

The History of Printed Circuit Boards – Infographic [en ligne]. PCB solutions, 2017 [consulté le 26.05.2019] : <https://www.pcb-solutions.com/pcb-market-monitor/the-history-of-pcb-infographic/>

POCIUS V. Alphonsus, 2002 :

POCIUS V. Alphonsus, *Adhesion and Adhesives Technology ; An Introduction*. 2^{ème} Edition. HANSER, Vienne, 2002.

QUYE Anita, WILLIAMSON Colin, 1999 :

QUYE Anita, WILLIAMSON Colin. *Plastics ; Collecting and Conserving*. NMS Publishing Limited, Cambridge, 1999.

RAMEL Sylvie, 15.09.2007 [en ligne] :

RAMEL Sylvie. *Point de vue sur la conservation-restauration des matières plastiques* [en ligne]. CeROArt, 15.09.2007 [consulté le 24.06.2019] : <https://journals.openedition.org/ceroart/395>

REMILLARD F. 2007 [en ligne] :

REMILLARD F. *Identification des plastiques et des élastomères ; tests miniaturisés* [en ligne]. Centre de conservation du Québec, 2007 [consulté le 30.06.2019] : http://www.ccq.gouv.qc.ca/fileadmin/images/img_centre-ress/microtest.pdf

Rhodia Operations, 25.04.2012 [en ligne] :

Fascicule de brevet européen : EP 2 443 082 B1. Office européen des brevets, Rhodia Operations. Jouve, Paris, 25.04.2012. In European publication server, Office européen des brevets, 15.06.2009 [consulté le 04.07.2019] : <https://data.epo.org/publication-server/rest/v1.0/publication-dates/20150527/patents/EP2443082NWB1/document.pdf>

RICHARD A. Nolan, 19.06.1979 [en ligne] :

RICHARD A. Nolan, *Implosion Protected CRT* [en ligne]. United States Patent, RCA Corporation, New York, 19.06.1979 [consulté le 23.05.2019] : <https://patentimages.storage.googleapis.com/e1/56/b0/d852306a391dca/US4158419.pdf>

RUSSEL Roslyn and WINKWORTH Kylie, 2009 [en ligne]:

RUSSEL Roslyn and WINKWORTH Kylie. *Significance 2.0 ; a guide to assessing the significance of collections* [en ligne]. 2nd Edition. Collections Council of Australia LTD, 2009 [consulté le 26.06.2019] : <https://www.arts.gov.au/sites/g/files/net1761/f/significance-2.0.pdf>

SHASHOUA Yvonne, 2008 :

SHASHOUA Yvonne. *Conservation of plastics : is it possible today ?*. In « PLASTICS; Looking at the Future and Learning from the Past ». Archetype Publications, London, 2008.

SHASHOUA Yvonne, 31.01.2012 [en ligne] :

SHASHOUA Yvonne. *Studies in active conservation of plastic artefacts in museums* [en ligne].

31.01.2012. In Conservation of plastics in collections, POPART, CRCC [consulté le 05.07.2019] :

<http://popart-highlights.mnhn.fr/active-conservation-of-plastic-artefacts/conservation-of-plastics-in-collections/index.html>

TETRAULT Jean. 18.05.2018 [en ligne] :

TETRAULT Jean. *Agent de détérioration : Polluants* [en ligne]. Gouvernement du Canada. ICC, 18.05.2018 [consulté le 01.07.2019] :

<https://www.canada.ca/fr/institut-conservation/services/publications-conservation-preservation/notes-institut-canadien-conservation/deceler-presence-soufre-papier-acetate.html>

TORRACA Giorgio, 1980 [en ligne] :

TORRACA Giorgio. *Solubilité et solvants utilisés pour la conservation des biens culturels* [en ligne].

ICCROM, 1980 [consulté le 25.06.2019] :

https://www.iccrom.org/sites/default/files/2018-02/1980_torraca_solubilite_fre_7337_light.pdf

WEISS P. 2009-2010 [en ligne] :

WEISS P. *La chimie des polymères* [en ligne]. Université Médicale Virtuelle Francophone, 2009-2010 [consulté le 07.07.2019] :

<http://campus.cerimes.fr/odontologie/enseignement/chap3/site/html/cours.pdf>

Wiktionnaire, 11.06.2018 [consulté le 07.07.2019] :

Déliquesence [en ligne]. Wiktionnaire, 11.06.2018 [consulté le 07.07.2019] :

<https://fr.wiktionary.org/wiki/d%C3%A9liquesence>

XU Wangjie and CO. 10.2018 [en ligne] :

XU Wangjie and CO. *Emission of sulfur dioxide from polyurethane foam and respiratory health effects* [en ligne]. Environmental Pollution, Volume 242, 10.2018. In Science Direct, Elsevier 2019 [consulté le 24.06.2019] :

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749118300514>

Liste des spectres

Spectre 1 FTIR-ATR, comparaison entre le spectre des zones A (gris) et un adhésif de polyuréthane (noir) © HE-Arc, 2019	40
Spectre 2 FTIR-ATR, comparaison entre le spectre des zones B (gris) avec le spectre de l'acide adipique (noir) © HE-Arc, 2019	41
Spectre 3 FTIR-ATR, spectre obtenu en analysant les échantillons des zones A (pics) : VR201_S2 et VR201_S4 © HE-Arc, 2019.....	112
Spectre 4 FTIR-ATR, spectre obtenu en analysant les échantillons des zones B (pics) : VR201_S1 et VR201_S3 © HE-Arc, 2019.....	112
Spectre 5 Spectre FTIR de cellules bactériennes, très différent des spectres obtenus © DELILLE Anne, 15.11.2007, p.93	113

Liste des tableaux

Tableau 1 Fiche d'identité de l'écran cathodique VT220 © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	14
Tableau 2 Fiche d'identité de l'écran cathodique VT220 © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	15
Tableau 3 Constat de l'altération sur l'écran VT220 © HE-Arc, N. Nydegger	21
Tableau 4 Constat de l'altération sur l'écran VR201 © HE-Arc, N. Nydegger	23
Tableau 5 Prélèvement pour analyses FTIR © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	38
Tableau 6 Résultats des tests et analyses © HE-Arc, N. Nydegger	49
Tableau 7 Conditions de conservation croisées, adaptée aux écrans cathodiques © HE-Arc, N. Nydegger	52
Tableau 8 Tests de pH d'un échantillon d'adhésif : résultats © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	102
Tableau 9 Paramètres de solubilité de l'acétone © HORIE Charles Velson, 1987, p.188	106
Tableau 10 Modèles d'écrans altérés au Musée Bolo © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	116
Tableau 11 Photographies générales du terminal VT220	119
Tableau 12 Photographies générales de l'écran VR201	120
Tableau 13 Altérations sur le terminal VT220 © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	121
Tableau 14 Altérations sur l'écran VR201 © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	122
Tableau 15 Autre VR201 très altéré © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	127
Tableau 16 Hypothèses de dégradation : arguments © HE-Arc, N. Nydegger	137

Liste des figures et crédits photographiques

Figure 1 Sections d'un écran cathodique © DeVere Chuck, 1967, p.1	11
Figure 2 Centre électrique des écrans cathodiques © DeVere Chuck, 1967, p.27	11
Figure 3 Ecrans cathodique sans aluminium (haut) et avec aluminium (bas) © DeVere Chuck, 1967, p.79.....	12
Figure 4 Terminal digital VT220 © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	14
Figure 5 Ecran digital VR201 © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	15
Figure 6 VR201, Bouton d'anode © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	16
Figure 7 Ecran VR201, zone d'injection de l'adhésif ? © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	17
Figure 8 VT220, boîtier en plastique © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	18
Figure 9 VT220, tube cathodique © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	18
Figure 10 VT220, deux circuits imprimés. Gauche : les composants de fonctionnement. Droite : l'ordinateur © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	18
Figure 11 VT220, châssis avec les composantes de l'anode © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	18
Figure 12 VR201, écran et boîtier © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	19
Figure 13 VR201, composantes de fonctionnement et tube cathodique © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	19
Figure 14 VR201, tube cathodique © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	19
Figure 15 VR201, boîtier en plastique avec plaques de cuivre © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	19
Figure 16 Coin en bas à droite de l'écran VT220, de face © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	21
Figure 17 Coin en bas à droite de l'écran VT220 (un peu plus centré) © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	21
Figure 18 Proche du centre de l'écran VT220 © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	22
Figure 19 Zone de superposition de la bande adhésive qui fait le tour de l'écran VT220 © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	22
Figure 20 Côté gauche de l'écran VT220 © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	22
Figure 21 Un peu au-dessus du coin gauche, de face, écran VR201 © HE-Arc, N. Nydegger, 2019 ...	23
Figure 22 Côté gauche, de face, écran VR201 © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	23
Figure 23 Même zone illuminée par une petite lampe de poche depuis l'arrière © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	23
Figure 24 Joint, côté gauche de face, écran VR201 © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	24
Figure 25 Même zone illuminée par une petite lampe de poche, écran VR201 © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	24
Figure 26 Coin supérieur droit, de face, écran VR201 © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	24

Figure 27 Zone de superposition de la bande adhésive, bas de l'écran VR201 © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	24
Figure 28 Bande adhésive, altération d'aspect cristallin et de forme concentrique © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	25
Figure 29 Echantillon d'adhésif avec quelques sphères © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	25
Figure 30 échantillon d'adhésif © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	25
Figure 31 Même échantillon d'adhésif après avoir cherché à gratter la sphère avec la pointe d'un scalpel © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	25
Figure 32 Exsudation observée sous la bande adhésive et sur l'adhésif entre l'écran de protection et l'écran du tube cathodique © HE-Arc, N. Nydegger 2019	26
Figure 33 Stratigraphie hypothétique de l'altération observée © HE-Arc, N. Nydegger 2019.....	27
Figure 34 Distribution schématique de la masse moléculaire d'un polymère © PONCIUS V. Alphonsus, 2002, p.120.....	28
Figure 35 Supposée action des silanes sur une surface inorganique © PONCIUS V. Alphonsus, 2002, p.145.....	29
Figure 36 Groupe uréthane © J. LICARI James, W. SWANSON Dale, 2005 [en ligne].....	30
Figure 37 Fabrication du polyuréthane © J. LICARI James, W. SWANSON Dale, 2005 [en ligne]	30
Figure 38 Action du dioxyde d'azote sur le polyuréthane © ALLEN N.S. EDGE M. and HORIE C.V., 1992, p.29	37
Figure 39 Echantillon VR201_S1 © HE-Arc, 2019.....	38
Figure 40 Echantillon VR201_S2 © HE-Arc, 2019.....	38
Figure 41 Echantillon VR201_S3 © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	39
Figure 42 Echantillon VR201_S4 © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	39
Figure 43 Echantillon d'adhésif avant dissolution © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	44
Figure 44 Echantillon d'adhésif après dissolution dans de l'acétone © HE-Arc, N. Nydegger, 2019....	44
Figure 45 Echantillon d'adhésif qui se désagrège après évaporation de l'acétone © HE-Arc, N. Nydegger	44
Figure 46 Blistering © QUYE Anita, WILLIAMSON Colin, 1999, p.112	46
Figure 47 Bloom © QUYE Anita, WILLIAMSON Colin, 1999, p.113	46
Figure 48 VR201 qui a commencé à suinter au bout de 6 semaines © HE-Arc, N. Nydegger, 2019 ...	48
Figure 49 En haut, coton-tige témoin en bas, celui utiliser pour absorbe un peu du liquide © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	48
Figure 50 VT220 sur un tapis antistatique, vu de dessous © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	83
Figure 51 VT220, enlever les caches 1 puis 2 © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	83
Figure 52 VT220, deux premiers caches enlevés © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	84
Figure 53 Figure 38 VT220, troisième cache © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	84
Figure 54 VT220, les trois vis sous les caches © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	84
Figure 55 VT220, enlever le couvercle d'accès © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	84

Figure 56 VT220, câble plat © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	85
Figure 57 VT220, câble plat déconnecté © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	85
Figure 58 VT220, Vis captive © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	85
Figure 59 VT220, Vis captive desserrée © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	85
Figure 60 VT220, deux entretoises en plastique © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	86
Figure 61 VT220, pincer le blocage et dégager gentiment le circuit imprimé © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	86
Figure 62 VT220 premier circuit imprimé démonté © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	86
Figure 63 VT220 double câble © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	87
Figure 64 VT220 double câble retiré © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	87
Figure 65 VT220, prise à 6 câbles reliés au circuit imprimé © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	87
Figure 66 VT220, prise à 7 câbles © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	87
Figure 67 VT220, En bas : câble blanc de terre. En haut : connecteur rond © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	88
Figure 68 VT220 câble blanc de terre déconnecté © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	88
Figure 69 VT220 connecteur rond retiré © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	88
Figure 70 VT220, retirer les quatre vis qui maintiennent le papier d'isolation et le circuit imprimé en place © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	89
Figure 71 VT220, circuit imprimé qui comporte les composantes de fonctionnement de l'autre côté © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	89
Figure 72 VT220, pinces à retirer avant d'enlever les quatre câbles reliés au deuxième circuit imprimé © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	89
Figure 73 VT220, retraitage du deuxième circuit imprimé © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	89
Figure 74 VT220, côté intérieur du circuit imprimé comportant les composantes de fonctionnement © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	90
Figure 75 VT220, plaque de soutien du circuit imprimé comprenant les composantes de fonctionnement © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	90
Figure 76 VT220, décharger le tube cathodique en reliant l'anode à la terre © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	90
Figure 77 VT220, bouton d'anode enlevé © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	90
Figure 78 VT220, défaire l'attache en plastique © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	91
Figure 79 VT220, les deux attaches de terre à détacher © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	91
Figure 80 VT220, boulon d'une des deux attaches de terre à détacher © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	91
Figure 81 VT220, châssis retiré © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	92
Figure 82 VT220, deux des quatre vis à retirer © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	92
Figure 83 VT220, une des quatre attaches de l'écran au boîtier © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	92
Figure 84 VT220, retirer les composantes © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	93
Figure 85 VR201 placé sur l'écran © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	94

Figure 86 VR201 Dévisser la vis à l'arrière © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	94
Figure 87 VR201, soulever le boîtier © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	95
Figure 88 VR201, câble de terre relié au cerclage métallique © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	95
Figure 89 VR201, dévisser le boulon © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	95
Figure 90 VR201, desserrer le cerclage métallique © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	95
Figure 91 VR201, retirer le câble de terre © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	96
Figure 92 VR201, retirer la boucle de la cathode © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	96
Figure 93 VR201, retirer le bouton d'anode © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	96
Figure 94 VR201 prise à 4 câbles couleurs © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	97
Figure 95 VR201, enlever le châssis et le circuit imprimé © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	97
Figure 96 VR201, soulever le cerclage métallique © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	97
Figure 97 Bandelettes test de pH avec charte indicative © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	101
Figure 98 Test avec échantillon © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	101
Figure 99 bandelette de gauche : pH de l'eau distillée. Bandelette de droite : pH de l'adhésif.....	102
Figure 100 pH de la bande adhésive (peu altérée) © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	102
Figure 101 Zones testées au Lumitester™ sur l'écran VT220 © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	104
Figure 102 Zones testées au Lumitester™ sur l'écran VR201 © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	104
Figure 103 Triangle de solubilité © TORRACA Giorgio, 1980, p.69	105
Figure 104 Triangle de solubilité de la résine de polyuréthane © HORIE Charles Velson, 1987, p.222	106
Figure 105 Triangle de solubilité du polyuréthane et paramètres de solubilité de l'acétone © HORIE Charles Velson, 1987	106
Figure 106 Papier à l'acétate de plomb © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	107
Figure 107 Eau oxygénée à 3%, trouvé en pharmacie © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	107
Figure 108 Installation pour le test du cheveu © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	108
Figure 109 Après le test du cheveu, le papier est devenu brun (haut) © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	108
Figure 110 Après l'ajout que quelques gouttes de peroxyde, le papier est redevenu blanc (haut) © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	108
Figure 111 installation pour le test de l'échantillon © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	109
Figure 112 Après le test de l'échantillon, le papier n'a pas changé de couleur (haut) © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	109
Figure 113, échantillon d'adhésif et fil de cuivre © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	110
Figure 114, place de travail pour le test de Beilstein © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	110
Figure 115 Disposition des pinces et de l'échantillon © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	110
Figure 116 Zone de prélèvement de l'adhésif © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	111
Figure 117 Plaquette avec échantillons pour analyse FTIR © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	111

Figure 118 Tests de mise en culture, partie 1 © Laboratoire de microbiologie de l'université de Neuchâtel, 2019	114
Figure 119 Tests de mise en culture, partie 2 © Laboratoire de microbiologie de l'université de Neuchâtel, 2019	114
Figure 120 Spectre du visible, entre 400 et 800 nanomètres © google image, 2019	115
Figure 121 VR201 – C au Musée Bolo © HE-Arc, N.Nydegger, 2019.....	116
Figure 122 VR201 au Musée Bolo © HE-Arc, N.Nydegger, 2019	116
Figure 123 VR201 au Musée Bolo © HE-Arc, N.Nydegger, 2019	116
Figure 124 VR201 au Musée Bolo © HE-Arc, N.Nydegger, 2019	116
Figure 125 VT220 – B au Musée Bolo © HE-Arc, N.Nydegger, 2019.....	117
Figure 126 HP – 2640A au Musée Bolo © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	117
Figure 127 HP- 2645A au Musée Bolo © HE-Arc, N.Nydegger, 2019	117
Figure 128 LSI au Musée Bolo © HE-Arc, N.Nydegger, 2019	117
Figure 129 HP – 9845B au Musée Bolo © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	118
Figure 130 Thomsons – CSF au Musée Bolo © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	118
Figure 131 NCR ? au Musée Bolo © HE-Arc, N.Nydegger, 2019.....	118
Figure 132 VT220 de face © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	119
Figure 133 VT220, arrière © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	119
Figure 134 VT220, côté droit, trois quarts arrières © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	119
Figure 135 VT220, côté gauche, trois quarts arrières © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	119
Figure 136 VT220, vue de dessus © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	119
Figure 137 Ecran VR201 démonté, de face © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	120
Figure 138 Boîtier de l'écran VR201, côté gauche	120
Figure 139 Boîtier de l'écran VR201, côté droit © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	120
Figure 140 Boîtier de l'écran VR201, arrière © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	120
Figure 141 Ecran VR201, côté gauche © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	120
Figure 142 Ecran VR201, côté droit © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	120
Figure 143 Ecran VR201, arrière © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	120
Figure 144 Poussière au niveau de l'assemblage du boîtier entourant l'écran © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	121
Figure 145 Corrosion métallique au niveau des pièces d'assemblage du boîtier © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	121
Figure 146 Rayures sur le boîtier © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	121
Figure 147 Coin en haut à droite, de face © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	122
Figure 148 Coulures/corrosions (?) à l'intérieur du boîtier (bas), côté écran © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	122
Figure 149 Coulures/corrosions (?) au niveau de l'emboîtement du cadre de l'écran © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	122

Figure 150 Coin en bas à droit, de face © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	123
Figure 151 Effritement de matière au niveau de la bande adhésive en contact avec le verre de l'écran de protection. Vue du haut © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	123
Figure 152 VT220, observation générale de l'altération étudiée © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	124
Figure 153 Prise de vue avec une lumière provenant de la gauche © HE-Arc, N. Nydegger, 2019 ..	124
Figure 154 Même prise de vue avec une lumière provenant de la droite © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	124
Figure 155 VR201, observation générale de l'altération étudiée © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	125
Figure 156 Test d'enlèvement de la première couche de bande adhésive, au niveau de la superposition. Ecran VR201 © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	126
Figure 157 Autre VR201, de face © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	127
Figure 158 Autre VR201, de trois quarts © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	127
Figure 159 Autre VR201, dessous de trois quarts © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	127
Figure 160 Autre VR201, coulure verte © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	128
Figure 161 Papier absorbant sur laquelle la substance a coulé © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	128
Figure 162 coulure et corrosion sur la plaque de cuivre inférieur © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	128
Figure 163 coulure vert turquoise sous l'écran, arrivant jusqu'au bouton d'anode © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	129
Figure 164 Coulure propagée dans le boîtier, sous l'écran © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	129
Figure 165 Cerclage métallique très corrodé © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	129
Figure 166 Autre partie du cerclage métallique corrodé © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	130
Figure 167 un des coins de l'écran tacheté © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	130
Figure 168 Taches jaunâtres © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	130
Figure 169 Cadre en plastique et métal © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	131
Figure 170 Ecran, vue de trois quarts © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	131
Figure 171 Coin supérieur gauche © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	131
Figure 172 Même coin, avec une lumière provenant de l'arrière © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	132
Figure 173 Aperçu détaillé sur une des coulures dans l'adhésif © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	132
Figure 174 côté inférieur, zones opaques © HE-Arc, N. Nydegger, 2019	132
Figure 175 Bande adhésive sur les côtés de l'écran © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.....	133
Figure 176 Additifs communs dans les plastiques © QUYE Anita, WILLIAMSON Colin, 1999, p.28...	134
Figure 177 Schéma stratigraphique des écrans cathodiques étudiés © HE-Arc, N. Nydegger, 2019.	135
Figure 178 Structure d'un écran cathodique © MENG Wen and Co., 2016.....	136

Annexes

Les annexes comportent le glossaire, les contacts, ainsi que sept parties distinctes :

Annexe 1 : des précisions sur les écrans cathodiques.

Annexe 2 : les protocoles de remontage et de démontage.

Annexe 3 : des détails concernant certaines hypothèses.

Annexe 4 : les tests et les marches à suivre.

Annexe 5 : illustration des spectres FTIR et des essais de mise en culture.

Annexe 6 : les photographies et images annexe.

Annexe 7 : une synthèse des hypothèses de dégradation.

Glossaire

- **Adsorption physique** : implique des forces de van der Waals partout dans l'interface adhésif-substrat. Les forces de van der Waals impliquent des attractions entre les dipôles permanents¹⁵⁴.
- **Agent de couplage silane** : substance réagissant chimiquement avec le substrat et l'adhésif en formant des liaisons covalentes à travers l'interface rendant l'adhésion forte et durable¹⁵⁵.
- **Anhydride** : composé chimique résultat de la déshydratation d'un composé acide¹⁵⁶.
- **Amorphe** : substance dont la structure n'est pas cristallisée¹⁵⁷.
- **Bioluminescence** : lumière produite par l'activité biologique. Celle-ci peut être détectée par un luminomètre (le Lumitester™ PD20 a été utilisé pour les tests)¹⁵⁸. La lumière est produite par extraction enzymatique d'adénine triphosphate (ATP) et d'adénosine monophosphate (AMP) grâce aux luciférases et pyruvates phosphates di kinase qui sont des enzymes¹⁵⁹.
- **Caractères de contrôle** : en informatique ce sont caractères invisibles permettant de déclencher des actions spécifiques à l'affichage ou à la transmission des données¹⁶⁰.
- **Charges granulaires** : *la farine de bois, les poudres de carbonate de calcium, de kaolin, d'argile, de mica, d'ardoise, le talc, la silice, la farine de diatomées, les sulfates de baryum et de calcium, l'alumine et d'autres poudres d'oxydes métalliques, les noirs de carbone, le graphite colloïdal, les déchets broyés de polymères ou de mélanges de polymères synthétiques*¹⁶¹.
- **Combustion de produits luminescents** : lorsque cela se produit, c'est-à-dire lorsque les faisceaux d'électrons sont trop denses, une perte définitive de l'efficacité des matériaux fluorescents d'émettre de la lumière s'en suit, pouvant aller jusqu'à la perte totale de la couche aux zones concernées¹⁶². Cette destruction provient de la chaleur dégagée par le bombardement d'électron qui prend trop de temps pour se dissiper¹⁶³. Ceci peut être évité s'il

¹⁵⁴ COMYN John. 1997, p.5

¹⁵⁵ Ibidem., p.28

¹⁵⁶ Larousse (1) [consulté le 06.07.2019] [en ligne]

¹⁵⁷ Larousse (2) [consulté le 07.07.2019] [en ligne]

¹⁵⁸ HyServe GmbH & Co. KG [en ligne] [consulté le 25.06.2019], p.1

¹⁵⁹ Ibidem.

¹⁶⁰ Manuel du programmeur Linux, 17.07.2008 [en ligne]

¹⁶¹ INRS, avril 2019 [en ligne], p.6

¹⁶² DeVere Chuck, 1967, p.77

¹⁶³ DeVere Chuck, 1967, p.77

y a assez de contrôle au niveau de l'intensité du faisceau d'électrons et la durée pendant laquelle un faisceau est dirigé sur une même section de la couche fluorescente¹⁶⁴.

- **Composés oxygénés** : alcools, cétones, aldéhydes, acides carboxyliques, chlorure d'hydrogène et hydrocarbures fluorés dans certains cas¹⁶⁵.
- **Couche de liaisons faibles** : les surfaces propres peuvent contribuer à la création des liaisons fortes avec des adhésifs¹⁶⁶.
- **Déflexion** : toute déviation (changement de direction) d'un faisceau de particules chargée par l'action d'un champ électrique ou magnétique¹⁶⁷.
- **Déliquescence** : en chimie, c'est la propriété de certains corps solides d'absorber de l'humidité et de passer dans un état liquide ou semi-liquide¹⁶⁸.
- **Diffusion** : les polymères en contact peuvent s'interpénétrer par diffusion, impliquant le fait que les liaisons initiales sont alors déplacées. Cela n'est possible que si les chaînes de polymères sont mobiles et compatibles¹⁶⁹.
- **Efflorescence** : Dépôt de cristaux blanc qui peuvent apparaître en surface d'un matériau poreux et qui provient de l'évaporation d'eau qui était saturée en sels solubles¹⁷⁰.
- **Electrostatique** : théorie surtout applicable aux métaux en contact, pouvant transférer des électrons créant une double couche électrique octroyant une force d'attraction¹⁷¹.
- **Exsudation / Suintement** : migration d'un composé visqueux comme une huile ou une résine¹⁷². Il s'agit d'une dégradation qui a été documentée à la surface d'une couche picturale, de bois mais aussi sur certains objets en plastiques, notamment les caoutchoucs¹⁷³. Pour ces derniers, ce seraient les plastifiants qui migreraient en surface¹⁷⁴.

¹⁶⁴ DeVere Chuck, 1967, p.77

¹⁶⁵ MAIRESSE M & CO. 1999 [en ligne]

¹⁶⁶ COMYN John. 1997, p.10

¹⁶⁷ Larousse (3) [consulté le 07.07.2019] [en ligne]

¹⁶⁸ Wiktionnaire, 11.06.2018 [consulté le 07.07.2019]

¹⁶⁹ COMYN John. 1997, p.9

¹⁷⁰ Centre de conservation Québec, 2019 [en ligne]

¹⁷¹ COMYN John. 1997, p.9

¹⁷² Centre de conservation Québec (2), 2019 [en ligne]

¹⁷³ Ibidem.

¹⁷⁴ Ibidem.

- **FTIR-ATR** : La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF) est la technique la plus couramment utilisée pour la caractérisation des structures moléculaires. Les liaisons moléculaires sont excitées par l'absorption de la lumière dans le domaine des longueurs d'ondes infrarouges (en général de 4000 à 600 cm⁻¹). Les groupes fonctionnels de chaque composant (amorphes, cristallins, minéraux ou organiques) peuvent être analysés avec une limite de détection d'environ 5 %. Un spectre caractéristique peut être associé à chaque composant. Cette technique présente l'avantage de permettre une analyse non-destructive des échantillons. Toutefois, dans ce cas, un micro-prélèvement a été nécessaire pour effectuer l'analyse, à cause de l'épaisseur et du poids des échantillons.

Appareil FTIR : Thermo Scientific Nicolet iN10 MX

Mode : ATR (Germanium), plage 4000- 600 cm⁻¹, résolution spectrale 4 cm⁻¹, interférogramme moyenné.

Les résultats présentés ci-dessous se basent sur les spectres élaborés à l'aide du logiciel Thermo Scientific OMNIC.

L'analyse FTIR-ATR permet d'analyser des échantillons qui ont un fort potentiel d'absorption des rayons infrarouges ou qui sont épais¹⁷⁵. Un cristal en diamant ou autre (germanium, argent, etc.) est utilisé pour sa grande réfraction des rayons infrarouges et permet d'analyser des échantillons à base de plastique et de colles notamment¹⁷⁶.

- **Humidité relative** : quantité de vapeur d'eau contenue dans un volume d'air donné par rapport à la quantité maximale qu'il pourrait renfermer à une température et pression définie¹⁷⁷.
- **Implosion** : phénomène physique qui peut survenir dans le cas d'un corps creux (comme un écran cathodique dans lequel il y a du vide) qui peut s'écraser violemment s'il est soumis à une pression externe qui est supérieure à sa résistance mécanique¹⁷⁸.
- **Langage C** : le C est un langage de programmation clef permettant d'utiliser le même code source sur divers architectures matérielles (ordinateurs) et il sera utilisé dans la plupart des systèmes d'exploitation, même modernes¹⁷⁹.

¹⁷⁵ Centre de conservation Québec (2), 2019 [en ligne]

¹⁷⁶ Ibidem.

¹⁷⁷ Gouvernement du Québec, 2019 [en ligne]

¹⁷⁸ Larousse (4) [consulté le 07.07.2019] [en ligne]

¹⁷⁹ Développez-com, 2000-2019 [en ligne]

- **Liaisons chimiques** : induit la formation de liaisons covalentes, ioniques ou hydrogènes entre les interfaces¹⁸⁰.
- **Limite élastique** : la limite élastique ou limite d'élasticité est la limite à laquelle une déformation devient irréversible si elle est dépassée.
- **Luminescence** : production de lumière quand un matériau comme le phosphore est excité par une source d'énergie (ici, les électrons)¹⁸¹. Si on aimerait être correcte, on parle de fluorescence lorsque de la lumière est émise pendant que la source d'énergie est appliquée et on parle de phosphorescence lorsque que la lumière est produite après qu'une source d'énergie ait été retirée¹⁸². Pour le cas du phosphore la fluorescence et la phosphorescence s'appliquent¹⁸³.
- **Lux** : le lux est une unité d'éclairement désignant la quantité de lumière à laquelle une surface ou un objet est exposé¹⁸⁴.
- **µW / lumen** : puissance relative du rayonnement ultraviolet par rapport à l'intensité de la lumière, exprimée en microwatts par lumen (µW / lm)¹⁸⁵.
- **Oligomère** : polymère constitué d'un nombre défini de sous-unités moléculaires (biochimie)¹⁸⁶.
- **Photoélectrique** : absorption de photons par la matière et libération consécutive d'électrons¹⁸⁷.
- **Phtalates** : les esters de phtalates sont utilisés comme plastifiants dans de nombreux plastiques¹⁸⁸.
- **Retardateurs de flammes halogénés** : les retardateurs de flammes ont pour but de piéger les espèces chimiques radicalaires qui se forment lors des processus de combustion d'un matériau, ralentissant ou arrêtant la prise des flammes¹⁸⁹.

¹⁸⁰ COMYN John. 1997, p.7

¹⁸¹ DeVere Chuck, 1967, p.61

¹⁸² Ibidem.

¹⁸³ Ibidem.

¹⁸⁴ MICHALSKI Stefan, 05.07.2018 [en ligne]

¹⁸⁵ Ibidem.

¹⁸⁶ Encyclopaedia Universalis France, 2019 (3)

¹⁸⁷ Larousse (5) [consulté le 07.07.2019] [en ligne]

¹⁸⁸ QUYE Anita, WILLIAMSON Colin, 1999, p.28

¹⁸⁹ MEBARKI Benaoumeur, juin 2015 [en ligne], p.15

- **Réticulé** : formation de liaisons chimiques dans un polymère conduisant à la formation d'un réseau¹⁹⁰.
- **RLU** : unité de mesure en bioluminescence, Relative Light Units, plus le résultat est élevé, plus le degré de contamination est élevé¹⁹¹.
- **Structure conjuguée** : alternation de liaisons simple et double dans une molécule organique¹⁹². Ce phénomène apporte une certaine stabilisation aux molécules en abaissant leur énergie et modifiant l'intervalle de longueur d'onde des rayonnements pouvant être absorbés¹⁹³.
- **Température de transition vitreuse** : à certaines températures (généralement en-dessous d'une valeur précise), le polymère devient cassant comme du verre. Les plastiques durs à température ambiante comme le polystyrène et le polyméthacrylate de méthyle sont vitreux à température ambiante, leur température de transition vitreuse étant de 105 et 115°C respectivement. Les plastiques souples à température ambiante comme le polyéthylène ou le polypropylène ont une température de transition vitreuse de -100 et -20°C respectivement¹⁹⁴.
- **Verrouillage mécanique** : si le substrat a une surface irrégulière, l'adhésif peut pénétrer dans les irrégularités, renforçant l'adhésion¹⁹⁵.
- **UNIX** : ancien système d'exploitation qui sera utilisé comme base pour les futurs Linux, BSD, MacOSX¹⁹⁶. Il sera utilisé sur la plupart des serveurs et gros systèmes ainsi que ces descendants¹⁹⁷.

¹⁹⁰ WEISS P. 2009-2010 [en ligne], p.9

¹⁹¹ HyServe GmbH & Co. KG [en ligne] [consulté le 25.06.2019], p.2

¹⁹² MH Magazine WordPress, 2019 [en ligne]

¹⁹³ Ibidem.

¹⁹⁴ BOUDET Alain. 2003, p.35

¹⁹⁵ COMYN John. 1997, p.10

¹⁹⁶ NGUYEN Marie-Lan, 02.05.2005 [en ligne]

¹⁹⁷ Ibidem.

Contacts

Bindschedler Saskia

Maître-assistante / Research and teaching assistant Laboratory of Microbiology University of Neuchâtel
Emile-Argand 11
CH-2000 Neuchâtel
Tel. +41 32 718 25 71
E-Mail. : www.unine.ch/lamun

Dag Spicer

Conservateur
Computer History Museum
Mountain View, Etats-Unis
Tel. (650) 810-1035
E-Mail. : spicer@computerhistory.org

Edith Joseph

Professeure assistante
Université de Neuchâtel
Institut de Chimie
Tel. : +41 32 718 22 35
E-Mail. : edith.joseph@he-arc.ch / edith.joseph@unine.ch

Isabelle Astic

Ingénieur de Recherche
Conservatoire national des arts et métiers – Musée des arts et métiers
E-Mail : isabelle.astic@cnam.fr

James Scott

Professeur et chef de la division santé professionnelle et environnementale
Dalla Lana School of Public Health
Université de Toronto, Canada
Tel. 416 946-8778
E-Mail : james.scott@utoronto.ca

Marc Egger

Enseignant spécialisation Matériaux et médias modernes

Haute école des arts de Berne

Département Conservation et restauration

Tel. : 031 848 38 96 (présent les jeudis)

E-Mail. : marc.egger@hkb.bfh.ch

Sergio Santander Aracena

European Society for Computer Preservation (Escop)

Fondateur, vice-président et directeur de la restauration

Directeur technique au *KNPQwest Italia* et au *Infinito/British Telecom*

E-mail. : info@escop.org

Sylvie Ramel

Consultante en conservation préventive

Conservatrice-restauratrice spécialisée en matériaux modernes et matériaux plastiques

Enseignante externe à la Haute école Arc de Neuchâtel.

Tel. : 06 87 11 45 48

E-Mail. : sylvieramel@hotmail.com

Yvonne Shashoua

Responsable scientifique

Archéologie environnementale et science des matériaux

Tel. : +45 41 20 64 81

E-Mail : Yvonne.Shashoua@natmus.dk

Annexe 1

Précisions sur les écrans cathodiques

Différences de fonctionnement entre le terminal VT220 et l'écran VR201

Les deux possèdent un écran pour afficher le retour d'informations à l'utilisateur. La principale différence se situe au niveau de leur connexion à l'ordinateur. L'écran VR201 est directement connecté à la sortie graphique de l'ordinateur tandis que le terminal VT220 est connecté via un réseau sur l'ordinateur. Le terminal est un ordinateur de moindre performance permettant de se connecter à un système distribué (ordinateur central). Celui-ci est plus puissant afin que plusieurs utilisateurs puissent travailler simultanément sur le même ordinateur central.

En atelier : les précautions à prendre avec des objets électroniques

Lorsqu'on aimerait travailler avec ce genre d'appareil électronique, il est recommandé de travailler sur un tapis antistatique. Le tapis antistatique permet de mettre l'objet sur une surface non chargée, servant principalement à ne pas endommager l'appareil¹⁹⁸.

Le bracelet antistatique permet de décharger l'utilisateur afin d'éviter que l'objet ne s'endommage en se déchargeant sur lui lorsqu'il le touche. Idéalement, on porte également des gants antistatiques et on veille à décharger les objets des potentiels restes d'électricité¹⁹⁹.

Il a fallu décharger les écrans cathodiques et se veiller à ne pas donner de choc à l'objet qui risque d'imploser et mettre en danger les travailleurs. Si possible on ne touche pas les objets sans gants car il y a également des substances nocives comme de la poudre de plomb à l'arrière du verre de l'ampoule de l'écran cathodique.

Si on soupçonne un dégagement de produits volatils nocifs, une aspiration avec une bonne qualité de filtration serait bienvenue également.

Pour le cas de soupçon de micro-organismes, il faut veiller à mettre un masque FFP2 ou FFP3, des gants (latex, vinyle ou nitrile), des lunettes de protection, une blouse de travail et attacher les cheveux.

¹⁹⁸ Selon entretien avec Romain Borgeaud et Cédric Gaudin

¹⁹⁹ Ibidem.

D'autres polymères dans l'électronique

La bakélite est une résine synthétique thermodurcissable à base de phénols et de formaldéhyde qui a une bonne résistance à la chaleur et à de nombreux produits chimiques en plus d'être un isolant électrique²⁰⁰. C'est une matière légère et semi-transparente qui a marqué les débuts de de l'industrie plastique du XXème siècle²⁰¹. La bakélite a été autrefois utilisée pour la confection des premiers circuits imprimés*, depuis 1920 pour la confection de gramophones et radios notamment²⁰², puis ensuite ce sont les résines époxy qui ont été utilisées²⁰³.

Les polyépoxydes sont des polymères thermodurcissables* utilisés notamment comme adhésifs, revêtements anti-corrosion et d'étanchéité. Renforcés par des fibres de verres ou de carbone, les polyépoxydes se trouvent notamment dans l'électronique, pour l'élaboration des supports de circuits imprimés²⁰⁴.

Le polyéthylène (PE) est utilisé comme isolant électrique des systèmes électriques et électroniques. C'est un thermoplastique semi-cristallin qui, en plus d'être un très bon isolant thermique, a une très bonne résistance chimique²⁰⁵.

Le polystyrène (PS) est un thermoplastique dur et cassant. Ses performances sont dites « moyennes » et il est beaucoup utilisés notamment pour la création de boîtiers électroniques ou électroménagers, boîtiers de chaînes haute-fidélité, touches de claviers électroniques, boîtiers de compact-disc et autres²⁰⁶.

Le polypropylène (PP) a une très bonne résistance aux produits chimiques, de bonnes propriétés d'isolation électrique et est imperméable à l'eau. Utilisations proches du PE mais est plus rigide²⁰⁷.

²⁰⁰ Encyclopaedia Universalis France (2), 2019

²⁰¹ Ibidem.

²⁰² PCB solutions, 2017 [en ligne]

²⁰³ Gralon, 08.04.2008 [en ligne]

²⁰⁴ BOUDET Alain. 2003, p.38

²⁰⁵ Ibidem., p.43

²⁰⁶ Ibidem., p.48

²⁰⁷ Ibidem., p.47

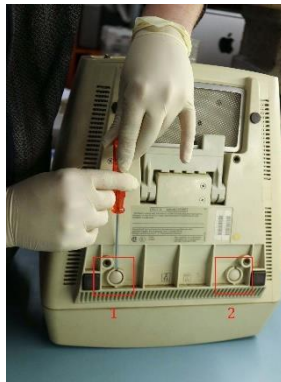
Annexe 2

Protocoles de démontage et de remontage

Les démontages et remontages ont été fait à l'atelier du Musée Bolo avec Romain Borgeaud.

Les protocoles sont présentés dans l'ordre du démontage. Le remontage se fait dans l'ordre inverse. Le protocole de démontage du terminal VT220 est basé sur les informations du guide d'entretien de poche valable pour les modèles A, B et C²⁰⁸ et notre propre expérience.

Démontage et remontage du terminal VT220

Indications	Photographies
1) Eteindre l'appareil et déconnecter le câble d'alimentation. 2) Placer l'objet sur l'écran, sur une feuille de papier afin d'éviter les frottements. Nous avons travaillé sur une surface plate sur un tapis antistatique préalablement nettoyé (figures 50-51, p.83).	 <i>Figure 50 VT220 sur un tapis antistatique, vu de dessous © HE-Arc, N. Nydegger, 2019</i>  <i>Figure 51 VT220, enlever les caches 1 puis 2 © HE-Arc, N. Nydegger, 2019</i>

²⁰⁸ DEC, 1986 [en ligne] pp.21-33

- 3) Avec un tournevis plat, enlever les deux premiers caches en plastiques (figure 52, p.84). Enlever le troisième cache sur l'arrière de l'objet (figure 53, p.84).



Figure 52 VT220, deux premiers caches enlevés © HE-Arc, N. Nydegger, 2019



Figure 53 Figure 38 VT220, troisième cache enlevé © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

- 4) Avec un tournevis Philips dévisser les trois vis sous les trois caches (figure 54, p.84).
- 5) Enlever le couvercle d'accès en le tirant vers le haut (figure 55, p.84).



Figure 54 VT220, les trois vis sous les caches © HE-Arc, N. Nydegger, 2019



Figure 55 VT220, enlever le couvercle d'accès © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

- 6) Déconnecter le câble plat servant à alimenter le circuit imprimé comprenant les composants de l'ordinateur (figures 56-57, p.85).

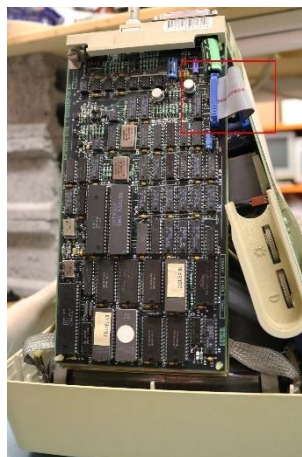


Figure 56 VT220, câble plat © HE-Arc, N. Nydegger, 2019



Figure 57 VT220, câble plat déconnecté
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019

- 7) Desserrer la vis captive sans l'enlever (figures 58-59, p.85).



Figure 58 VT220, Vis captive © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

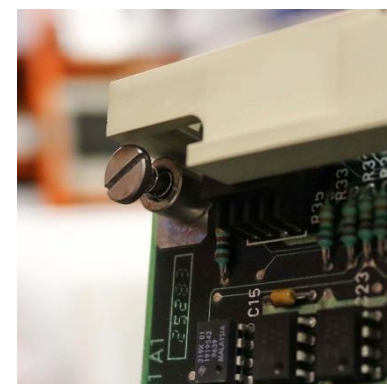


Figure 59 VT220, Vis captive desserrée
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019

- 8) Pincer les trois entretoises en plastique avec une pince plate et retirer légèrement le circuit imprimé (figures 60-61-62, p.86).

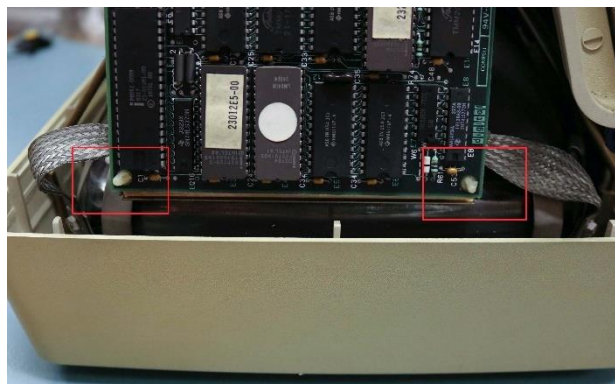


Figure 60 VT220, deux entretoises en plastique
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019



Figure 61 VT220, pincer le blocage et dégager gentiment
le circuit imprimé © HE-Arc, N. Nydegger, 2019



Figure 62 VT220 premier circuit imprimé démonté © HE-Arc,
N. Nydegger, 2019

Une fois cette étape réalisée il est possible de retirer le second circuit imprimé qui comprend les composants de fonctionnement de l'appareil.

- 9) Déconnecter le double câble relié au témoin d'alimentation (figure 63-64, p.87).



Figure 63 VT220 double câble
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019



Figure 64 VT220 double câble retiré © HE-Arc,
N. Nydegger, 2019

- 10) Déconnecter la prise à 6 câbles reliée au circuit imprimé (figure 65, p.87).
- 11) Déconnecter la prise à 7 câbles qui est reliée proche du transformateur (figure 66, p.87).

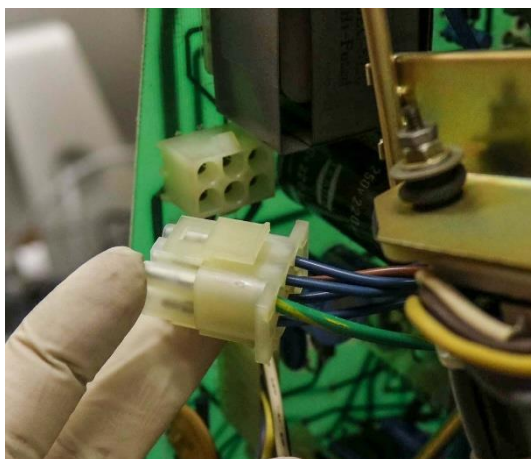


Figure 65 VT220, prise à 6 câbles reliés au circuit imprimé
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019

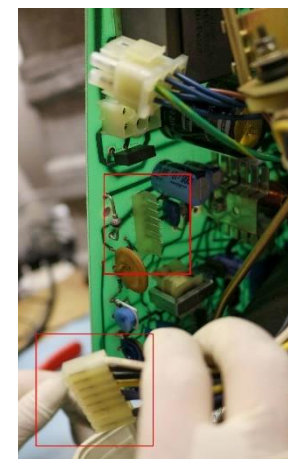


Figure 66 VT220, prise à 7 câbles © HE-Arc,
N. Nydegger, 2019

- 12) Retirer le câble de terre blanc de l'attache de la boucle de terre du tube cathodique (figures 67-68, p.88).



Figure 67 VT220, En bas : câble blanc de terre. En haut : connecteur rond © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

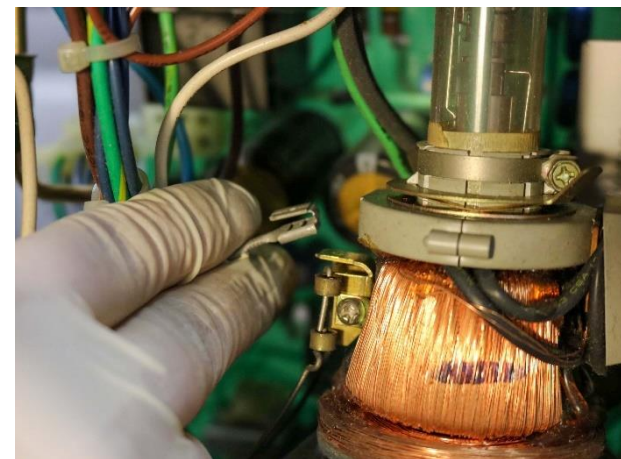


Figure 68 VT220 câble blanc de terre déconnecté © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

- 13) Retirer le connecteur rond à la base du tube cathodique (figure 69, p.88).

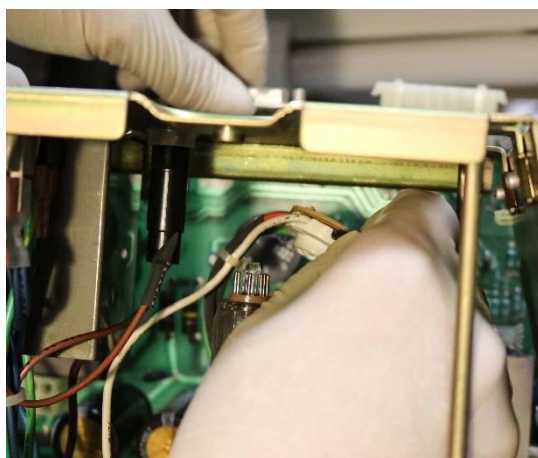


Figure 69 VT220 connecteur rond retiré © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

- 14) Dévisser les quatre vis qui maintiennent le papier d'isolation et le circuit imprimé en place et retirer le papier (figures 70-71, p.89)

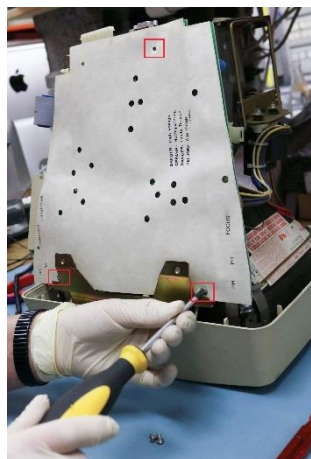


Figure 70 VT220, retirer les quatre vis qui maintiennent le papier d'isolation et le circuit imprimé en place
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019

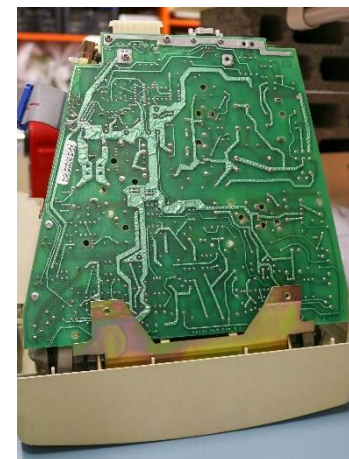


Figure 71 VT220, circuit imprimé qui comporte les composants de fonctionnement de l'autre côté
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019

- 15) Défaire le serre-câble en plastique qui maintient les quatre câbles à enlever du circuit imprimé puis enlever le circuit imprimé (figures 72-75, p.89-90).

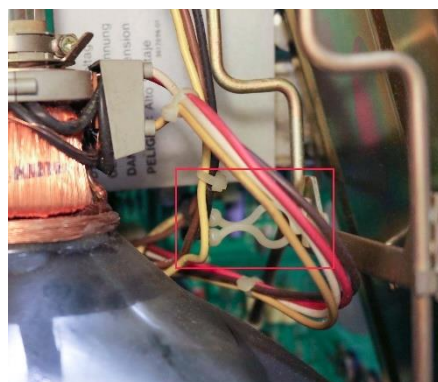


Figure 72 VT220, pincettes à retirer avant d'enlever les quatre câbles reliés au deuxième circuit imprimé
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019

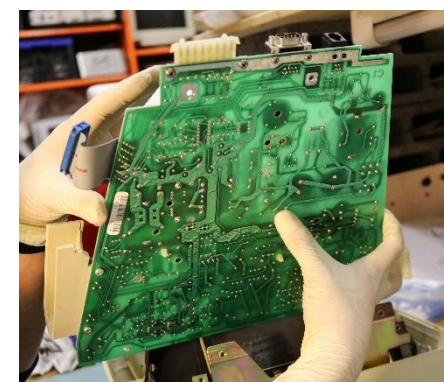


Figure 73 VT220, retraitage du deuxième circuit imprimé
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019



Figure 74 VT220, côté intérieur du circuit imprimé comportant les composants de fonctionnement
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019

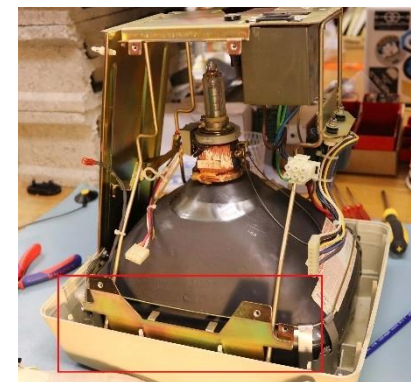


Figure 75 VT220, plaque de soutien du circuit imprimé comprenant les composants de fonctionnement
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019

La prochaine étape est plus délicate et nécessite de décharger l'anode du tube cathodique car il peut y avoir un haut voltage.

- 16) Décharger le tube cathodique sur le bouton d'anode : connecter l'anode à la terre grâce à un tournevis et un câble et garder le contact pendant 3 secondes au moins. La terre est prise sur le châssis (figure 76, p.90). Enlever le bouton d'anode (figure 77, p.90).



Figure 76 VT220, décharger le tube cathodique en reliant l'anode à la terre © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

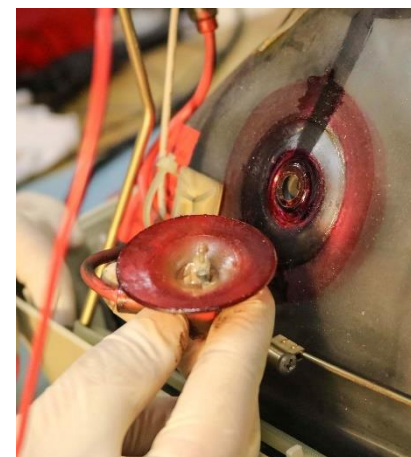


Figure 77 VT220, bouton d'anode enlevé
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019

17) Défaire l'attache en plastique qui maintient le bouton d'anode au tube cathodique (figures 78-79, p.91)

18) Retirer les boulons des deux attaches de terre qui maintiennent le châssis à l'écran à l'aide d'une clef anglaise (figure 80, p.91).

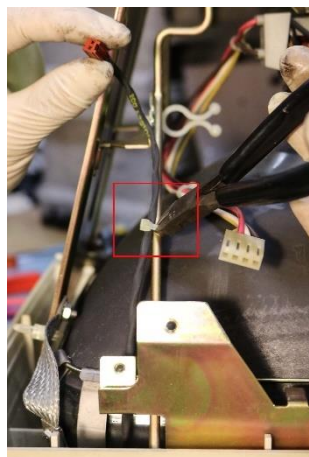


Figure 78 VT220, défaire l'attache en plastique
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019

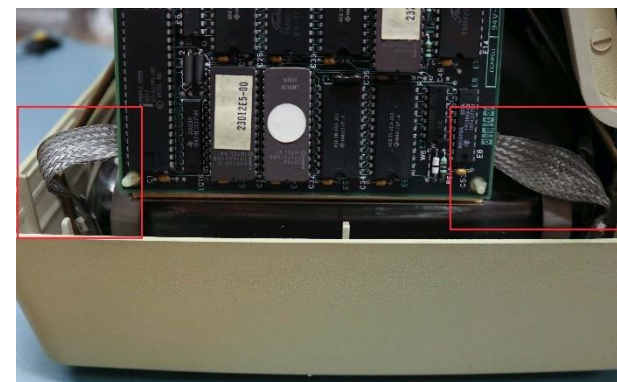


Figure 79 VT220, les deux attaches de terre à détacher
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019

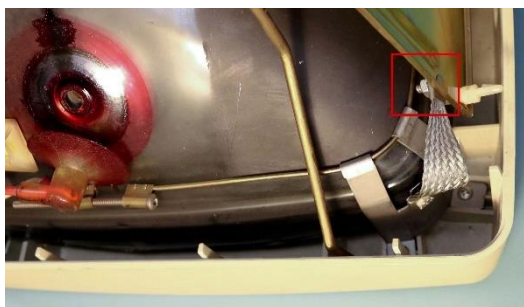


Figure 80 VT220, boulon d'une des deux attaches de terre
à détacher © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

- 19) Retirer le châssis en le tirant doucement vers le haut (figure 81, p.92).



Figure 81 VT220, châssis retiré © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

- 20) Dévisser (tournevis Philips 2) les quatre attaches (une dans chaque coin) qui maintiennent le boîtier de l'écran à l'écran cathodique (figures 82-83, p.92) et retirer le cadre métallique et ses composantes (figure 84, p.93).

Il est maintenant possible de retirer le tube cathodique pour l'examiner.

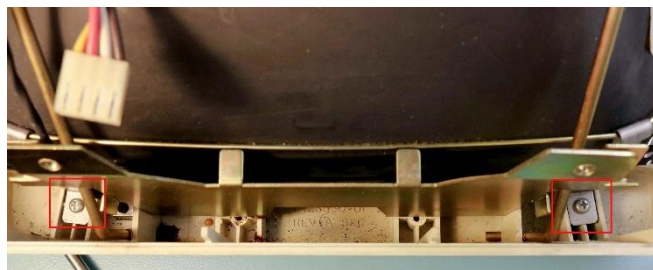


Figure 82 VT220, deux des quatre vis à retirer
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019



Figure 83 VT220, une des quatre attaches de l'écran
au boîtier © HE-Arc, N. Nydegger, 2019



Figure 84 VT220, retirer les composantes
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019

Démontage et remontage de l'écran VR201

Le démontage de l'écran VR201 est moins complexe que pour le terminal VT220.

Indications	Photographies
1) Eteindre l'appareil et déconnecter le câble d'alimentation. 2) Placer l'objet sur l'écran, sur une feuille de papier afin d'éviter les frottements. Nous avons travaillé sur une surface plate sur un tapis antistatique préalablement nettoyé (figure 85, p.94). 3) Dévisser la vis à l'arrière du boîtier (figure 86, p.94)	 Figure 85 VR201 placé sur l'écran © HE-Arc, N. Nydegger, 2019  Figure 86 VR201 Dévisser la vis à l'arrière © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

- 4) Soulever le boîtier vers le haut (figure 87, p.95).
- 5) Dévisser le boulon sur le cerclage métallique (figure 88, p.95) et retirer le câble de terre blanc attaché au cerclage métallique (figure 89, p.95).
- 6) Desserrer le cerclage métallique (figure 90, p.95)



Figure 87 VR201, soulever le boîtier
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019



Figure 88 VR201, câble de terre relié au cerclage métallique © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

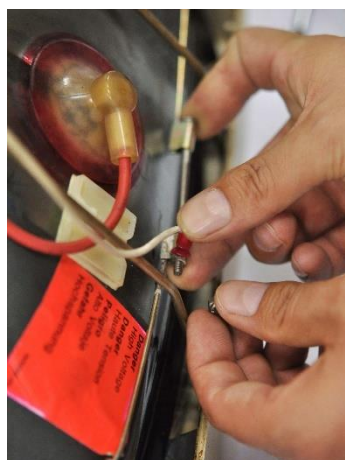


Figure 89 VR201, dévisser le boulon
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019

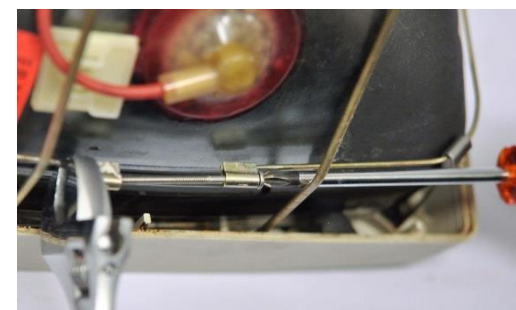
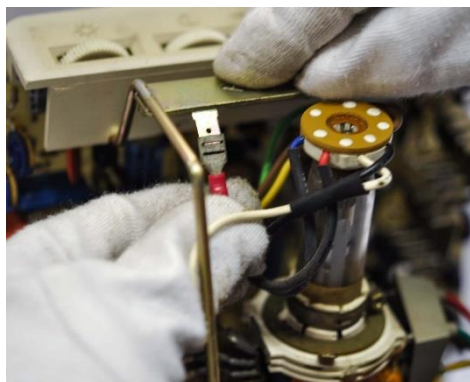


Figure 90 VR201, desserrer le cerclage métallique
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019

- 7) Retirer le câble de terre blanc relié au tube cathodique (figure 91, p.96) et débrancher la boucle de la cathode (figure 92, p.96).



*Figure 91 VR201, retirer le câble de terre
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019*



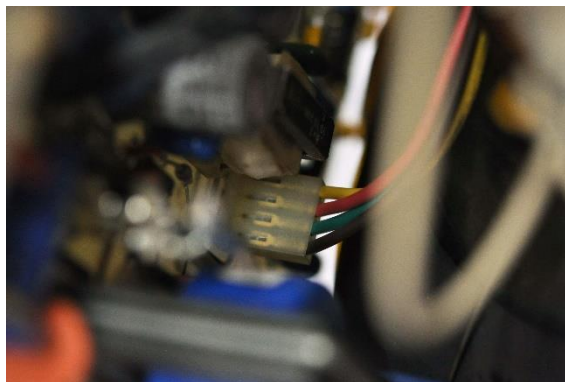
*Figure 92 VR201, retirer la boucle de la cathode
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019*

- 8) Retirer le bouton d'anode après l'avoir déchargé (figure 93, p.96).

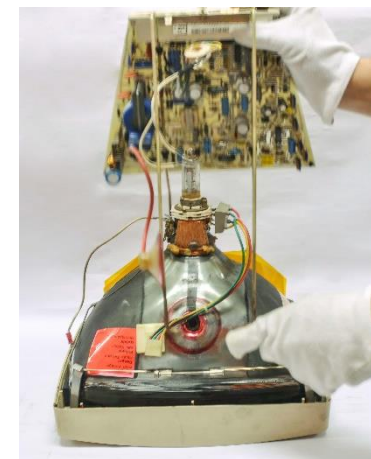


*Figure 93 VR201, retirer le bouton d'anode
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019*

- 9) Retirer la prise à 4 câbles relié au circuit imprimé (figure 94, p.97).
- 10) Soulever le châssis avec le circuit imprimé (figure 95, p.96).



*Figure 94 VR201 prise à 4 câbles couleurs
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019*



*Figure 95 VR201, enlever le châssis et le circuit
imprimé © HE-Arc, N. Nydegger, 2019*

- 11) Retirer le cerclage métallique en le soulevant (figure 96, p.97)
- 12) Retirer l'écran de son boîtier avant.

Il est alors possible d'observer l'écran cathodique.



*Figure 96 VR201, soulever le cerclage métallique
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019*

Annexe 3

Détails de certaines hypothèses

Détails de la dégradation thermique

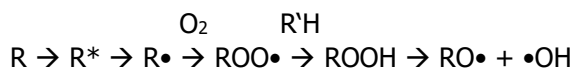
Sans rupture des chaînes polymères, il peut y avoir une libération de monomères ou produits de base résiduels comme les phénols, isocyanates et même les amines²⁰⁹ ainsi qu'une libération de produits auxiliaires volatils ou de solvants présents à l'étape de pré transformation du plastique²¹⁰. Cela peut tout à fait être le cas lors de la préparation d'une résine polyuréthane.

Avec rupture de chaîne polymère, c'est-à-dire en général à de hautes températures entre 150 et 400°C²¹¹, il peut y avoir un début de décomposition dépendant de la présence d'oxygène pouvant dégager des produits volatils comme des hydrocarbures aromatiques et aliphatiques et autres composés oxygénés*.

Il peut alors s'en suivre une dépolymérisation, processus de dégradation selon laquelle la chaîne de polymère se divise en fragments identiques comme des monomères, dimères ou trimères²¹².

Détails de la photodégradation

La photodégradation se déroule en deux parties distinctes : la photolyse puis une auto-oxydation²¹³.



R* : absorption de radiations UV

O₂ : Oxygène

RO : Groupe carboxyle

R• : Radical libre → R'H : Acide

OH : Groupe hydroxyle

La matière se dégrade à cause de l'effet des rayons ultraviolet (photolyse) et, en s'oxydant, forme des groupes hydroxyles et carboxyles (auto-oxydation).

²⁰⁹ American Chemistry Council, février 2008 [en ligne]

²¹⁰ MAIRESSE M & CO. 1999 [en ligne]

²¹¹ INRS, 2017 [en ligne]

²¹² ALLEN N.S. EDGE M. and HORIE C.V., 1992, p.22

²¹³ Ciba [consulté le 27.06.2019] [en ligne]

Paramètres à prendre en compte lors de la fabrication d'un adhésif

- La mauvaise quantité d'additif²¹⁴.
- Le mauvais additif ; pas assez de compatibilité avec le plastique (souvent le cas pour les plastifiants et colorants)²¹⁵.
- La migration de composés en surface : dépend de la compatibilité avec le plastique, voulu pour certaines applications (agents antistatiques), migration non-intentionnelle (antioxydants et colorants) et peut survenir également lorsque le matériau subit trop de stress dû aux conditions/contraintes environnementales²¹⁶.
- Des exigences de traitements pouvant affecter le produit de façon irréversible²¹⁷.
- La dispersion incomplète ou trop hétérogène dans le produit²¹⁸.
- Des effets secondaires indésirés²¹⁹.

Les antioxydants

Les stabilisateurs à la chaleur et à la lumière sont fréquemment rajoutés dans les plastiques. On retrouve des amines et dérivés de phénols (benzène), des organoétains, du noir de carbone, des sels de plomb ainsi que des stéarates²²⁰.

L'hypothèse d'une efflorescence provenant des antioxydants est probable. De plus ceux-ci peuvent rencontrer des défauts de dispersion lorsqu'ils sont mélangés à un plastique : s'ils ne sont pas fondus assez bien à cause de leur haute température de fusion, les antioxydants peuvent rester sous forme de larges morceaux et ne se dispersent pas correctement dans le mélange²²¹.

Tout type d'additif de type antioxydant est susceptible de former des exsudations et migrations en surface d'un plastique s'il est mal dispersé dans la matière²²².

²¹⁴ MYER Ezrin, 1996, p.22

²¹⁵ Ibidem.

²¹⁶ Ibidem.

²¹⁷ MYER Ezrin, 1996, p.22

²¹⁸ Ibidem.

²¹⁹ Ibidem.

²²⁰ QUYE Anita, WILLIAMSON Colin, 1999, p.28

²²¹ MYER Ezrin, 1996, p.27

²²² Ibidem., p.28

Les charges dans les adhésifs de polyuréthane

Il y a de nombreuses charges et renforts qui peuvent être ajoutés à un plastique. Ceux-ci sont à base de matière organique, végétale ou synthétique ou encore minérale²²³. Les charges permettent d'améliorer certaines caractéristiques comme les propriétés physiques, thermiques, mécanique, électrique et aussi de diminuer les coûts de fabrication²²⁴.

Les charges qui sont ciblées sont celles qui peuvent être ajoutés sous forme de poudre ou de billes, ce qu'on appelle des charges granulaires²²⁵. Les charges granulaires* sont nombreuses.

Il est possible aussi que des microbilles de verre ou de polyester soient ajoutées dans les adhésifs de polyuréthane afin d'augmenter certaines propriétés de renfort ou simplement augmenter le volume d'adhésif²²⁶ pour diminuer les coûts de fabrication.

En fonction de la quantité ajoutée, plusieurs propriétés des polymères peuvent être modifiées et il est possible que ces charges migrent en surface avec le temps. La disposition des taches et la forme un peu bombée de l'écran cathodique pourrait expliquer la plus grande concentration sur les bords.

Certaines dégradations ont été observées notamment pour le cas de polyuréthanes chargés avec du sel (NaCl) et du chlorate d'ammonium (NH_4ClO_3) vieillit artificiellement dans un milieu thermo-hygrométrique non adapté²²⁷.

L'étude a montré qu'à 50% d'humidité relative* et 60°C, un polyuréthane avec ces charges perd sa limite élastique²²⁸. Cela est dû à la diffusion de l'humidité et à la déliquescence* du sel, provoquant une perte d'adhésion entre la charge et le polyuréthane²²⁹.

Si un vieillissement artificiel se fait à 97% d'humidité relative, le polyuréthane perd de la résistance à cause d'une redistribution du sel après déliquescence, formant alors des agrégats en surface et augmentant le nombre de trous dans la matière²³⁰. Une autre étude a montré qu'un polyuréthane chargé au chlorate d'ammonium peut, en présence d'humidité, voir sa charge se séparer²³¹. On pourrait imaginer que les sphères observées soit formées par la séparation d'une charge de ce type.

²²³ INRS, avril 2019 [en ligne], p.6

²²⁴ Ibidem

²²⁵ Ibidem

²²⁶ Selon entretien avec Yvonne Shashoua

²²⁷ BESSON Nathalie, 1996-1997 [en ligne], p.34

²²⁸ Ibidem

²²⁹ Ibidem

²³⁰ Ibidem

²³¹ Ibidem

Annexe 4

Tests et marche à suivre

Tests de mesure de l'acidité

Marche à suivre et résultats

Les tests de mesure de l'acidité permettent d'avoir une idée du pH d'un échantillon d'adhésif. En le comparant à celui de l'eau distillée, on peut au moins savoir si l'échantillon est plutôt acide ou basique.

Matériel :

- Eau distillée
- 1 fiole en verre
- 3 bandes de papier pH
- 1 échantillon d'adhésif
- 1 échantillon de bande adhésive
- 1 source de chaleur (briquet)

Le premier test consiste à mettre un peu d'eau distillée dans une fiole en verre puis de mesurer son pH avec une bandelette de test. Les deuxième et troisième test sont fait de façon identique : un échantillon à tester est placé dans une fiole avec un peu d'eau distillée puis une source de chaleur est appliquée pour que l'adhésif se décompose un peu. On insère ensuite le papier pH qui est à chaque fois laissé reposer pendant 10 minutes (figure 98, p.101). On compare ensuite le résultat obtenu avec la charte de pH (figure 97, p.101). Les résultats sont synthétisés dans un tableau (tableau 8, p.102).



Figure 97 Bandelettes test de pH avec charte indicative © HE-Arc, N. Nydegger, 2019



Figure 98 Test avec échantillon © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

Tableau 8 Tests de pH d'un échantillon d'adhésif : résultats © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

Test	pH	Photographie
1) Eau distillée	5-6	 Figure 99 bandelette de gauche : pH de l'eau distillée. Bandelette de droite : pH de l'adhésif © HE-Arc, N. Nydegger, 2019
2) Eau distillée et échantillon d'adhésif chauffé	3	
3) Eau distillée et échantillon d'une bande adhésive chauffée	3-4	 Figure 100 pH de la bande adhésive (peu altérée) © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

Tests de bioluminescence

Marche à suivre et résultats

La marche à suivre utilisée était le document disponible avec l'appareil de mesure Lumitester™ fournit par la Haute Ecole Arc.

Matériel utilisé :

- 1 paire de gants jetables en latex
- 1 Lumitester™ PD20
- 6 Ecouvillons LuciPac™ PEN

Les zones testées étaient les zones de superposition de la bande adhésive, sur le bas de l'écran (figures 101-102, p.104). Ces zones sont plus jaunies et avaient l'air également plus exposées à l'air ambiant. Si des micro-organismes c'étaient infiltré jusqu'ici, ça aurait été depuis l'air et l'adhésif qui aurait été le substrat et/ou la source de nourriture était plus concentrée à cet endroit (superposition). Il y semblait également y avoir des zones peu étanches, où de l'air et de l'humidité aurait pu s'infiltrer.

Résultats des tests :

- T1 : 15 RLU
- T2 : 23 RLU
- T3 : 31 RLU
- T4 : 6 RLU

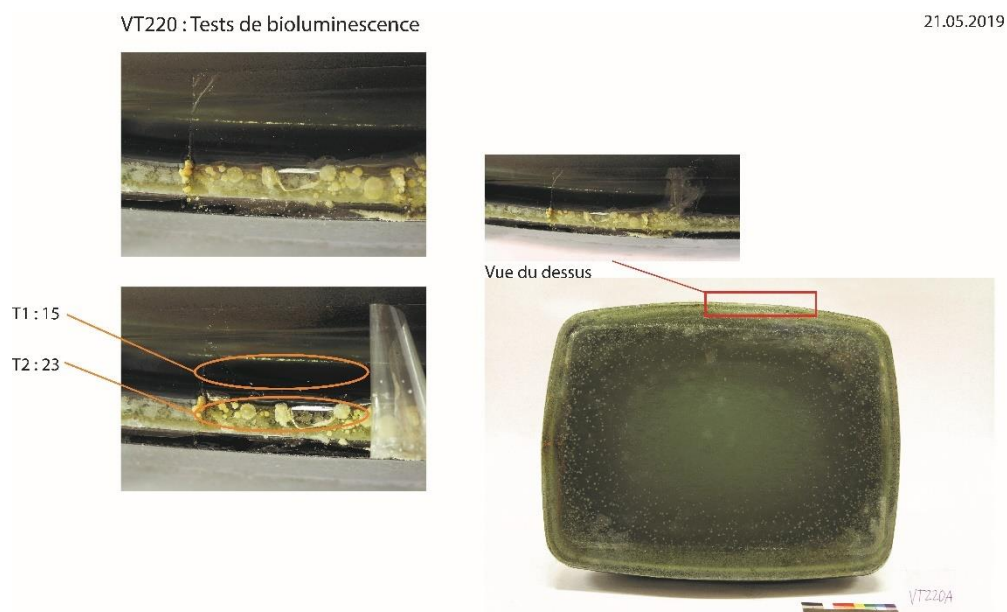


Figure 101 Zones testées au Lumitester™ sur l'écran VT220 © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

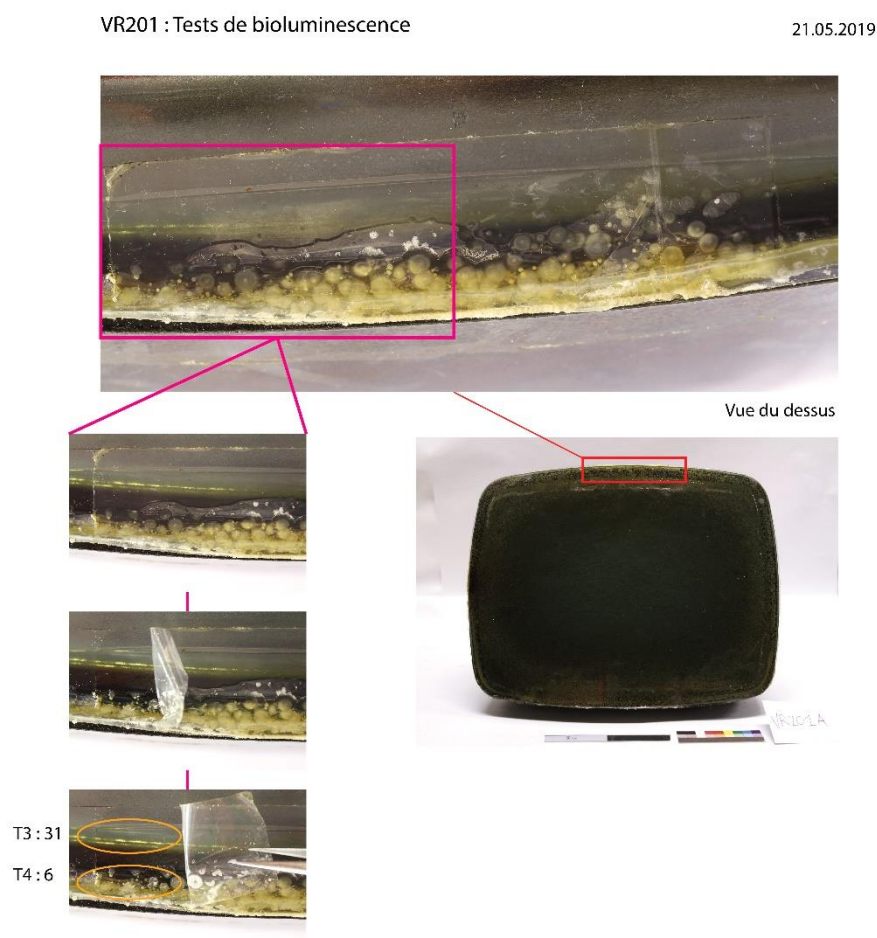


Figure 102 Zones testées au Lumitester™ sur l'écran VR201 © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

Choix du solvant organique pour une dissolution

Il y a plusieurs questions à se poser lorsqu'on aimerait observer la solubilité d'un polymère : quel liquide dissout le matériau, quelle est la viscosité de la solution formée et quel est le degré de dissolution²³². Pour savoir quel solvant pourrait dissoudre une ancienne colle de polyuréthane, il existe ce que l'on appelle le triangle de solubilité, basé sur trois paramètres : la contribution croissante de la liaison hydrogène, la contribution croissante de l'attraction dipolaire et la contribution croissante des forces de dispersion²³³ (figure 103, p.105).

Il en découle des chartes de solubilité des polymères et c'est celle du polyuréthane qui concerne cette étude (figure 104, p.106). A partir de ces informations il est possible de vérifier si un solvant comme l'acétone (ou propanone) peut dissoudre le polyuréthane. Pour cela, on compare le triangle de solubilité du polyuréthane aux données de dissolution de l'acétone (tableau 9 et figure 105, p.106). Un solvant organique comme l'acétone a l'air de pouvoir être efficace pour dissoudre un adhésif à base de polyuréthane si on se réfère au triangle de solubilité.

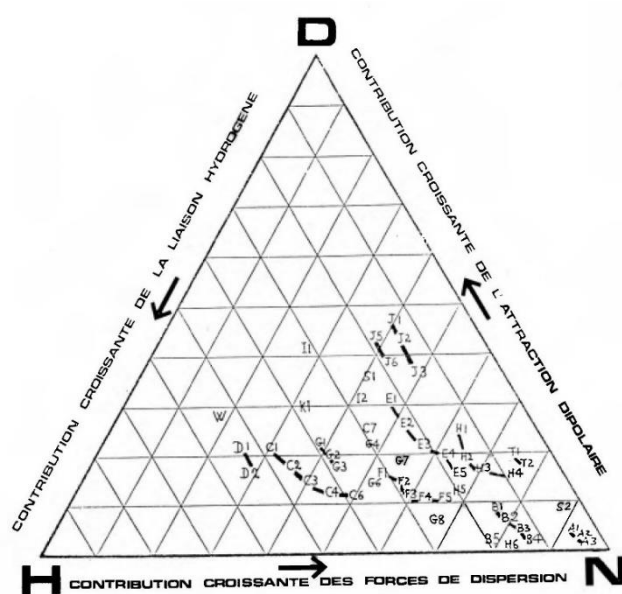


DIAGRAMME DES SOLVANTS

Données tirées de la brochure "Predicting Resin Solubilities" de J.P. Teas, imprimée par la Ashland Chemicals Company, Columbus, Ohio, U.S.A. . Voir aussi la table des solvants dans les pages suivantes.

Dans le diagramme et dans la table des solvants qui suit :

- N = Forces de dispersion (Non-polaires)
- D = Dipôles permanents
- H = Liaisons hydrogène

Figure 103 Triangle de solubilité © TORRACA Giorgio, 1980, p.69

²³² HORIE Charles Velson, 1987, p.41

²³³ TORRACA Giorgio, 1980 [en ligne], p.69

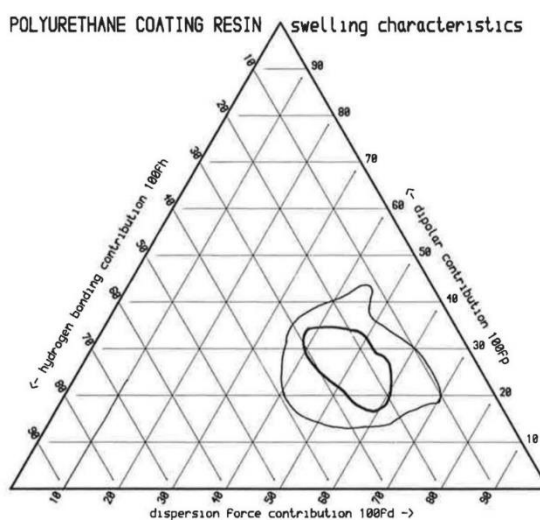


Figure A3.30 Swelling behaviour of a polyurethane (Viacryl/Desmodur, see section 13.3). Contours are shown at 100% (—) and 200% (—) swelling in solvent

Figure 104 Triangle de solubilité de la résine de polyuréthane © HORIE Charles Velson, 1987, p.222

Tableau 9 Paramètres de solubilité de l'acétone © HORIE Charles Velson, 1987, p.188

Solvant	Paramètres de solubilité		
	100fh (H)	100fp (D)	100fd (N)
Acétone (propanone)	21	32	47

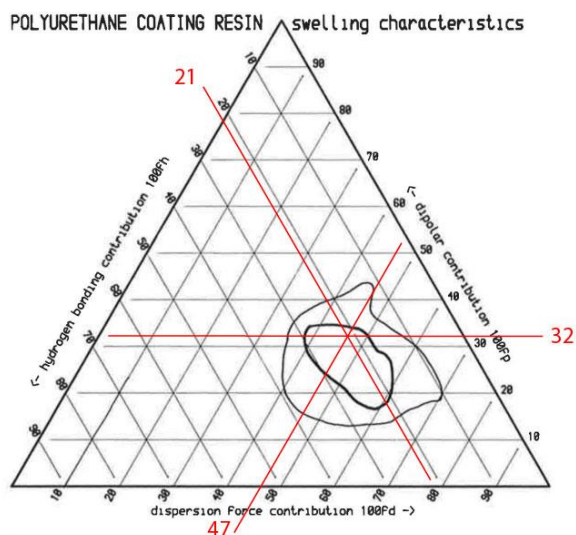


Figure A3.30 Swelling behaviour of a polyurethane (Viacryl/Desmodur, see section 13.3). Contours are shown at 100% (—) and 200% (—) swelling in solvent

Figure 105 Triangle de solubilité du polyuréthane et paramètres de solubilité de l'acétone © HORIE Charles Velson, 1987

Tests de détection du soufre

Marche à suivre et résultats

Les tests de détection du soufre se sont faits en deux parties : d'abord un test sur un matériaux contenant du soufre, un cheveu, puis ensuite avec un échantillon d'adhésif. La marche à suivre utilisée est celle qu'on retrouve sur l'ICC²³⁴.

Matériel utilisé :

- 2 Fioles en verre
- Parafilm M
- Briquet et chalumeau portable
- 2 Papiers réactif à l'acétate de plomb (figure 106, p.107)
- Un statif
- Eau distillée
- Peroxyde d'hydrogène à 3% v/v, trouvé en pharmacie (figure 107, p.107)
- 1 Echantillon de cheveu
- 1 Echantillon d'adhésif à tester



Figure 106 Papier à l'acétate de plomb
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019



Figure 107 Eau oxygénée à 3%, trouvé en pharmacie
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019

²³⁴ ICC, 27.11.2017 [en ligne]

Afin de s'assurer de la fonctionnalité du test, il est préférable d'en faire un sur un échantillon dont on est sûr qu'il contient du soufre, comme un cheveu²³⁵. Une fois que le papier d'acétate de plomb a été imprégné d'eau distillée et que l'installation était terminée, l'échantillon a pu être chauffé (figure 108, p.108).

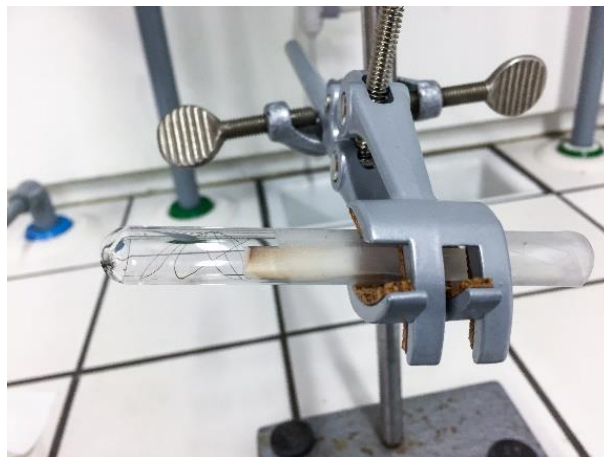


Figure 108 Installation pour le test du cheveu © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

Le test est positif, le papier imprégné est devenu brun et il y avait une forte odeur de soufre. Les quelques gouttes de peroxyde ont confirmé qu'il s'agissait bien de soufre lorsqu'il est redevenu blanc après avoir été entré en contact avec le liquide²³⁶ (figures 109-110, p.108).



Figure 109 Après le test du cheveu, le papier est devenu brun (haut) © HE-Arc, N. Nydegger, 2019



Figure 110 Après l'ajout que quelques gouttes de peroxyde, le papier est redevenu blanc (haut) © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

Une fois ce premier essai effectué, le test a pu être appliqué à un échantillon d'adhésif (figure 111, p.109). Le résultat est négatif, le papier imprégné d'acétate de plomb n'a pas changé de couleur et il n'y avait pas d'odeur de soufre comme pour le cheveu (figure 112, p.109). Par contre il se dégageait une très forte odeur de plastique fondu et quelque chose qui évoquait le chlore.

²³⁵ ICC, 27.11.2017 [en ligne]

²³⁶ Ibidem



Figure 111 installation pour le test de l'échantillon
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019



Figure 112 Après le test de l'échantillon,
le papier n'a pas changé de couleur (haut)
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019

Les mousses de polyuréthane peuvent dégager du dioxyde de soufre, polluant de l'air qui peut provoquer des dégâts sur les matériaux présents dans le même environnement si sa concentration est trop élevée²³⁷. C'est aussi un polluant nocif pour la santé²³⁸. Si du soufre peut se dégager de l'adhésif, celui-ci pourrait faciliter les réactions d'hydrolyse et éventuellement participer à la formation de la dégradation étudiée.

Test de Beilstein : détection de produits halogénés

Marche à suivre et résultats

La marche à suivre a été choisie parmi les quatre propositions de l'Institut canadien de conservation :

« 3. Tenir le fil chauffé au rouge dans la flamme et placer un fragment de l'échantillon à proximité de celle-ci, ou bien dedans, jusqu'à ce qu'il commence à se carboniser. Rapprocher aussitôt ce fragment de la prise d'air, à la base du brûleur, pour que la fumée soit attirée dans le brûleur et se mêle intimement avec le mélange de gaz combustibles. Si la flamme se teinte de vert autour du fil de cuivre, le test est positif. »²³⁹

Un fil de cuivre fin et un morceau d'échantillon de l'adhésif à tester ont été préparé pour le test de Beilstein (figure 113, p.110). Le test a été effectué à la HE-Arc, sur une place de travail dédiée au brasage et soudage, sous une aspiration adaptée (figure 114, p.110). La luminosité a été réduite pour bien voir la couleur de la flamme. Les outils utilisés ont préalablement été chauffés pour les défaire de

²³⁷ XU Wangjie and CO. 10.2018 [en ligne]

²³⁸ Ibidem

²³⁹ ICC, 22.02.2019 [en ligne]

toute substance qui aurait pu fausser le résultat. L'échantillon a été placé dans une pince qui était elle-même tenue par les pinces spéciales résistant aux hautes températures de chauffe (figure 115, p.110).



Figure 113, échantillon d'adhésif et fil de cuivre © HE-Arc, N. Nydegger, 2019



*Figure 114, place de travail pour le test de Beilstein
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019*



*Figure 115 Disposition des pinces et de l'échantillon
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019*

Le résultat s'est avéré être positif pour la présence de produits halogénés, une flamme verte intense mais très brève a été aperçue pendant le test.

Annexe 5

Analyses FTIR et essais de mise en culture

Techniques d'analyse des polymères

Il existe des tests destructifs permettant de déterminer si un plastique est dit thermodurcissable ou thermoplastique. Un thermodurcissable ne fond pas lorsqu'on l'expose à une forte température tandis que les thermoplastiques fondent²⁴⁰. Il existe également plusieurs techniques d'analyses des surfaces modernes : la spectroscopie photoélectrique par rayons X (XPS) ou spectroscopie électronique pour analyses chimiques (ESCA), la spectrométrie de masse des ions secondaires (SIMS), la spectrométrie statique de masse des ions secondaires (SSIMS), la spectroscopie des électrons d'Auger (AES), la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) et la réflectance totale atténuée (ATR) ou la réflectance-absorption (IRAS)²⁴¹.

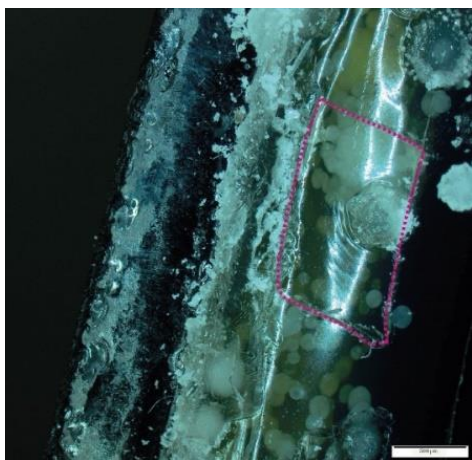


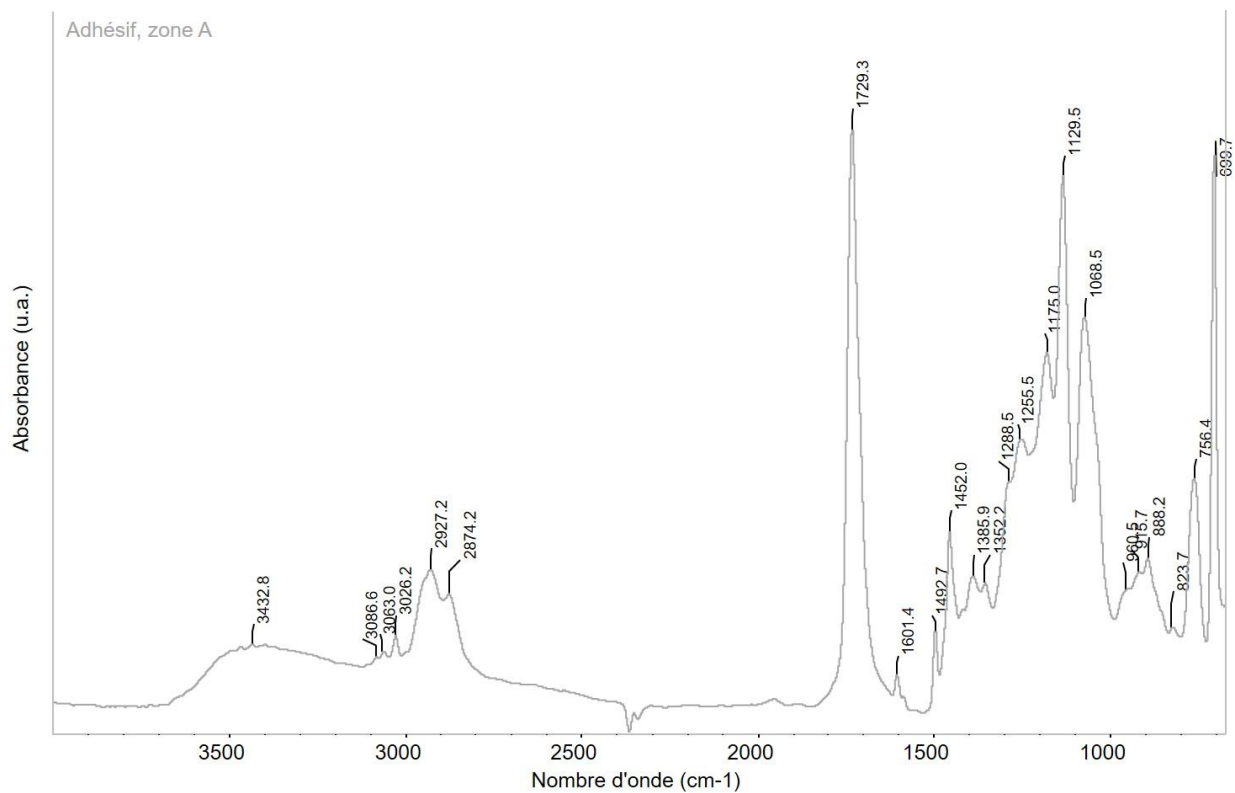
Figure 116 Zone de prélèvement de l'adhésif
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019



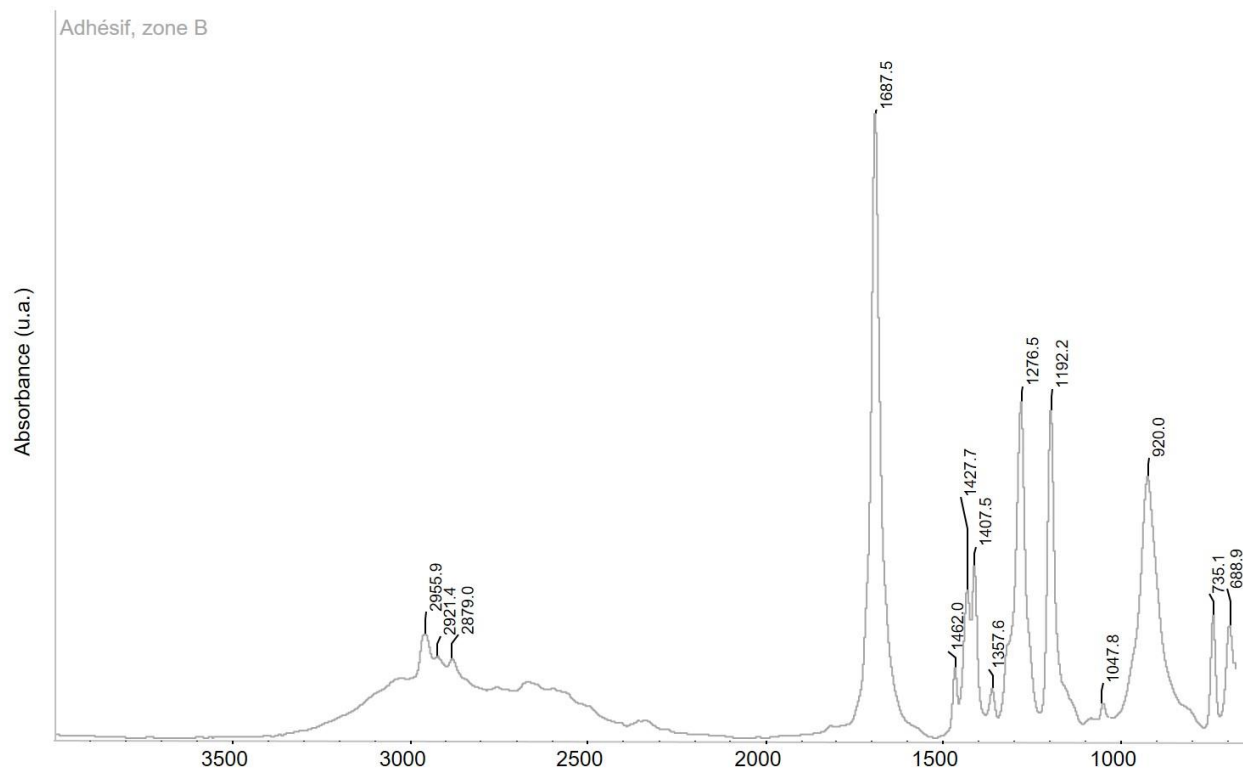
Figure 117 Plaquette avec échantillons pour analyse FTIR
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019

²⁴⁰ BOUDET Alain. 2003, p.52

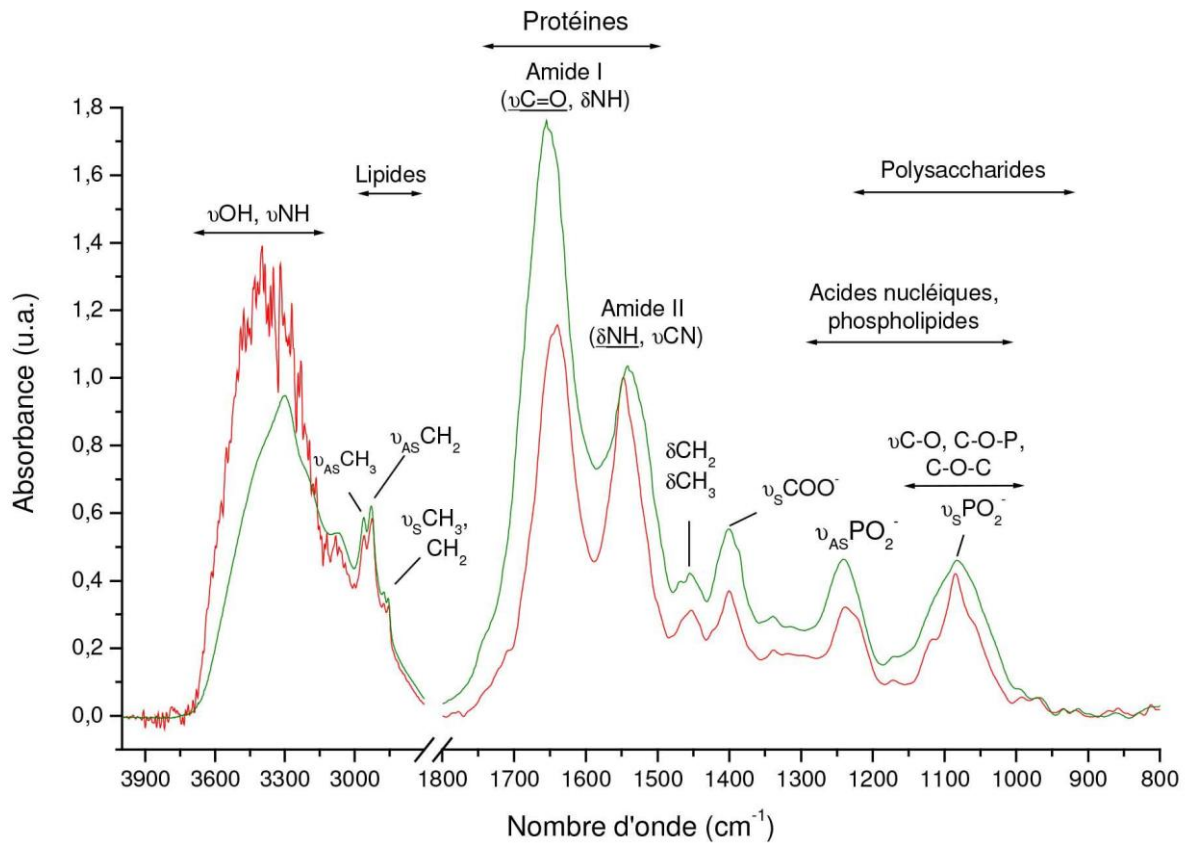
²⁴¹ POCIUS V. Alphonsus, 2002, p.110-111



Spectre 3 FTIR-ATR, spectre obtenu en analysant les échantillons des zones A (pics) : VR201_S2 et VR201_S4
© HE-Arc, 2019



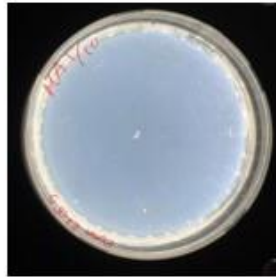
Spectre 4 FTIR-ATR, spectre obtenu en analysant les échantillons des zones B (pics) : VR201_S1 et VR201_S3
© HE-Arc, 2019



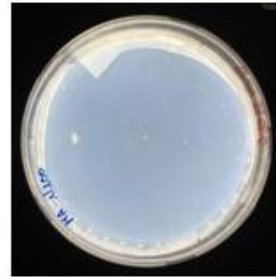
Spectre 5 Spectre FTIR de cellules bactériennes, très différent des spectres obtenus
 © DELILLE Anne, 15.11.2007, p.93

Milieux malt-agar: mise en évidence de champignons/moisissures

Malt 1.2g/L

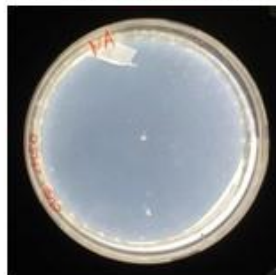


Malt 0.12g/L



Milieux nutrient-agar: mise en évidence de bactéries

Bouillon nutritif 8g/L



Bouillon nutritif 0.8g/L

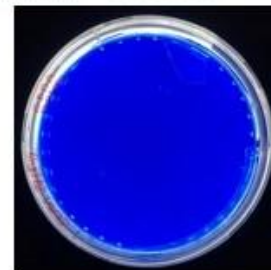


Figure 118 Tests de mise en culture, partie 1 © Laboratoire de microbiologie de l'université de Neuchâtel, 2019

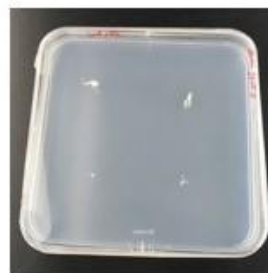
Milieu Yeast-malt-glucose: mise en évidence d'actinobactéries



Milieu RBBR: mise en évidence de micro-organismes capables de dégrader des noyaux aromatiques



Milieux agar-eau: mise en évidence de micro-organismes oligotrophes et/ou actifs dans l'échantillon prélevé (les autres milieux contiennent une source de carbone qui aurait pu favoriser la germination de spores)



NB: La boîte de droite contient moins d'eau que celle de gauche (mise en évidence de micro-organismes xerophiles).

Figure 119 Tests de mise en culture, partie 2 © Laboratoire de microbiologie de l'université de Neuchâtel, 2019

Annexe 6

Photographies et images

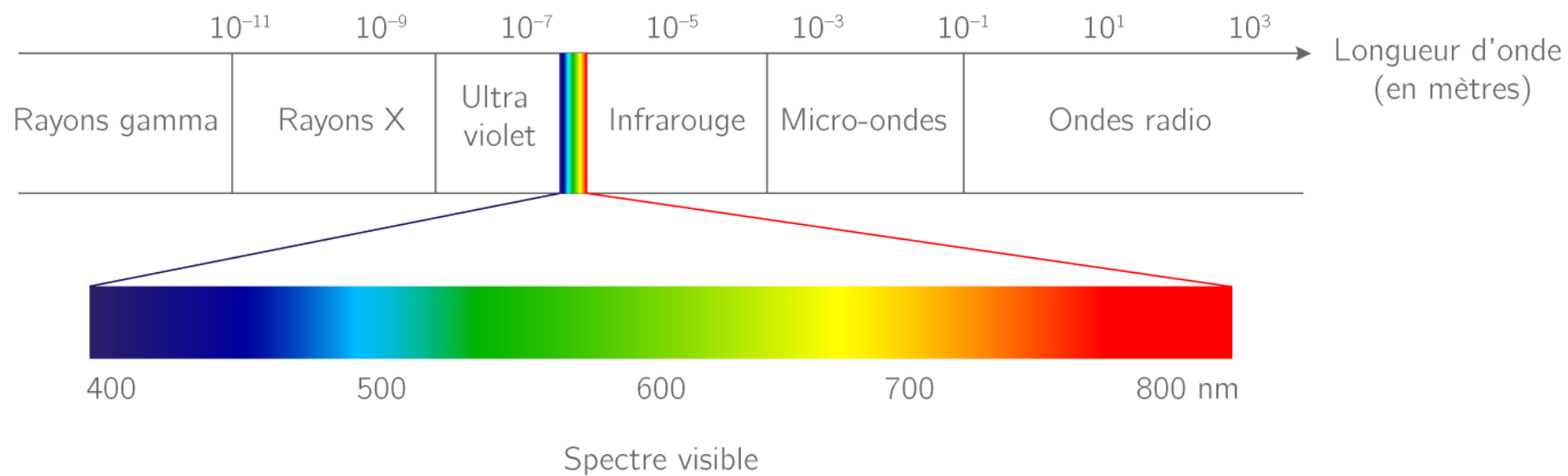


Figure 120 Spectre du visible, entre 400 et 800 nanomètres © google image, 2019

Tableau 10 Modèles d'écrans altérés au Musée Bolo © HE-Arc, N.Nydegger, 2019

Modèle	Photographie	Modèle	Photographie
VR201 – C 20 Juin 1983		VR201 7 Mars 1983	
VR201 29 Novembre 1982		VR201	

Figure 121 VR201 – C au Musée Bolo
© HE-Arc, N.Nydegger, 2019

Figure 122 VR201 au Musée Bolo
© HE-Arc, N.Nydegger, 2019

Figure 123 VR201 au Musée Bolo
© HE-Arc, N.Nydegger, 2019

Figure 124 VR201 au Musée Bolo
© HE-Arc, N.Nydegger, 2019

VT220 – B
15 Avril 1984



Figure 125 VT220 – B au Musée Bolo
© HE-Arc, N.Nydegger, 2019

HP – 2640A
Année de
production :
1975-1982



Figure 126 HP – 2640A au Musée Bolo
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019

HP – 2645A



Figure 127 HP- 2645A au Musée Bolo
© HE-Arc, N.Nydegger, 2019

LSI



Figure 128 LSI au Musée Bolo © HE-Arc, N.Nydegger, 2019

HP – 9845B



Figure 129 HP – 9845B au Musée Bolo
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019

Thomson - CSF



Figure 130 Thomsons – CSF au Musée Bolo
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019

NCR (?)



Figure 131 NCR ? au Musée Bolo
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019

Tableau 11 Photographies générales du terminal VT220



Figure 132 VT220 de face © HE-Arc, N. Nydegger, 2019



Figure 133 VT220, arrière © HE-Arc, N. Nydegger, 2019



Figure 134 VT220, côté droit, trois quarts arrières © HE-Arc, N. Nydegger, 2019



Figure 135 VT220, côté gauche, trois quarts arrières © HE-Arc, N. Nydegger, 2019



Figure 136 VT220, vue de dessus © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

Tableau 12 Photographies générales de l'écran VR201



Figure 137 Ecran VR201 démonté, de face © HE-Arc, N. Nydegger, 2019



Figure 138 Boîtier de l'écran VR201, côté gauche
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019



Figure 139 Boîtier de l'écran VR201, côté droit
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019



Figure 140 Boîtier de l'écran VR201, arrière
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019



Figure 141 Ecran VR201, côté gauche
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019

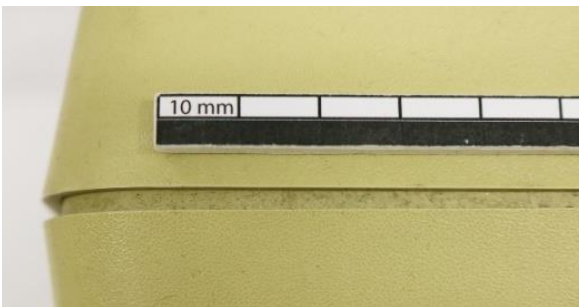


Figure 142 Ecran VR201, côté droit
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019



Figure 143 Ecran VR201, arrière
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019

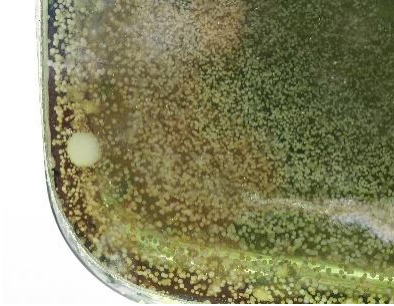
Tableau 13 Altérations sur le terminal VT220 © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

Altération	Boîtier	Ecran	Composantes électroniques	Photographie
Empoussièrement	X	X	X	 Figure 144 Poussière au niveau de l'assemblage du boîtier entourant l'écran © HE-Arc, N. Nydegger, 2019
Corrosion	X		X	 Figure 145 Corrosion métallique au niveau des pièces d'assemblage du boîtier © HE-Arc, N. Nydegger, 2019
Rayures	X			 Figure 146 Rayures sur le boîtier © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

Taches de tailles et couleurs différentes		X		 Figure 147 Coin en haut à droite, de face © HE-Arc, N. Nydegger, 2019
---	--	---	--	---

Tableau 14 Altérations sur l'écran VR201 © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

Altération	Boîtier	Ecran	Composantes électroniques	Photographie
Empoussièrément	X	X	X	-
Coulures/corrosions (?)	X		X	 Figure 148 Coulures/corrosions (?) à l'intérieur du boîtier (bas), côté écran © HE-Arc, N. Nydegger, 2019  Figure 149 Coulures/corrosions (?) au niveau de l'emboîtement du cadre de l'écran © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

Taches de tailles et couleurs différentes		X		 <i>Figure 150 Coin en bas à droit, de face</i> © HE-Arc, N. Nydegger, 2019
Effritement de matière		X		 <i>Figure 151 Effritement de matière au niveau de la bande adhésive en contact avec le verre de l'écran de protection.</i> Vue du haut © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

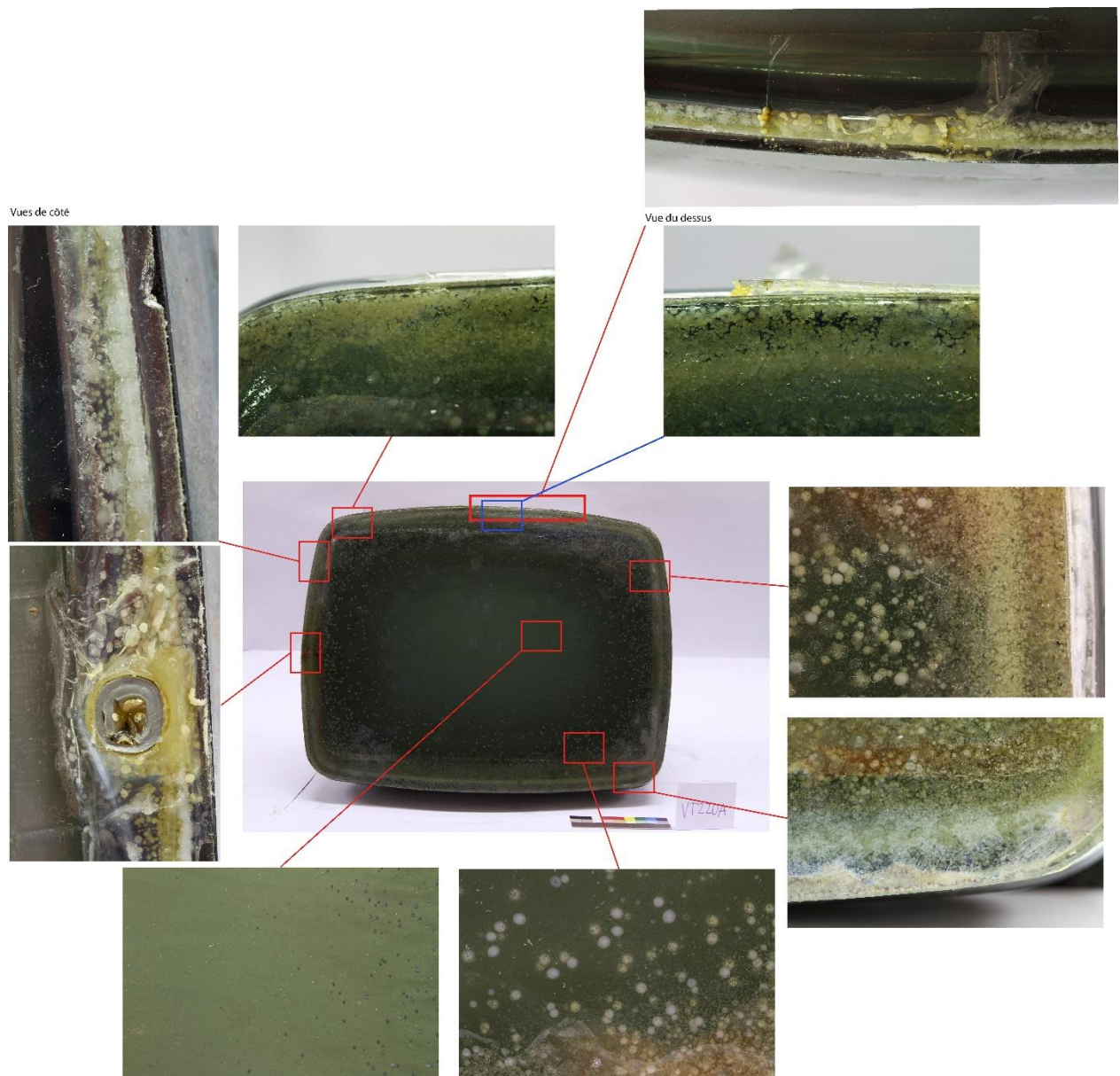


Figure 152 VT220, observation générale de l'altération étudiée © HE-Arc, N. Nydegger, 2019



Figure 153 Prise de vue avec une lumière provenant de la gauche © HE-Arc, N. Nydegger, 2019



Figure 154 Même prise de vue avec une lumière provenant de la droite © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

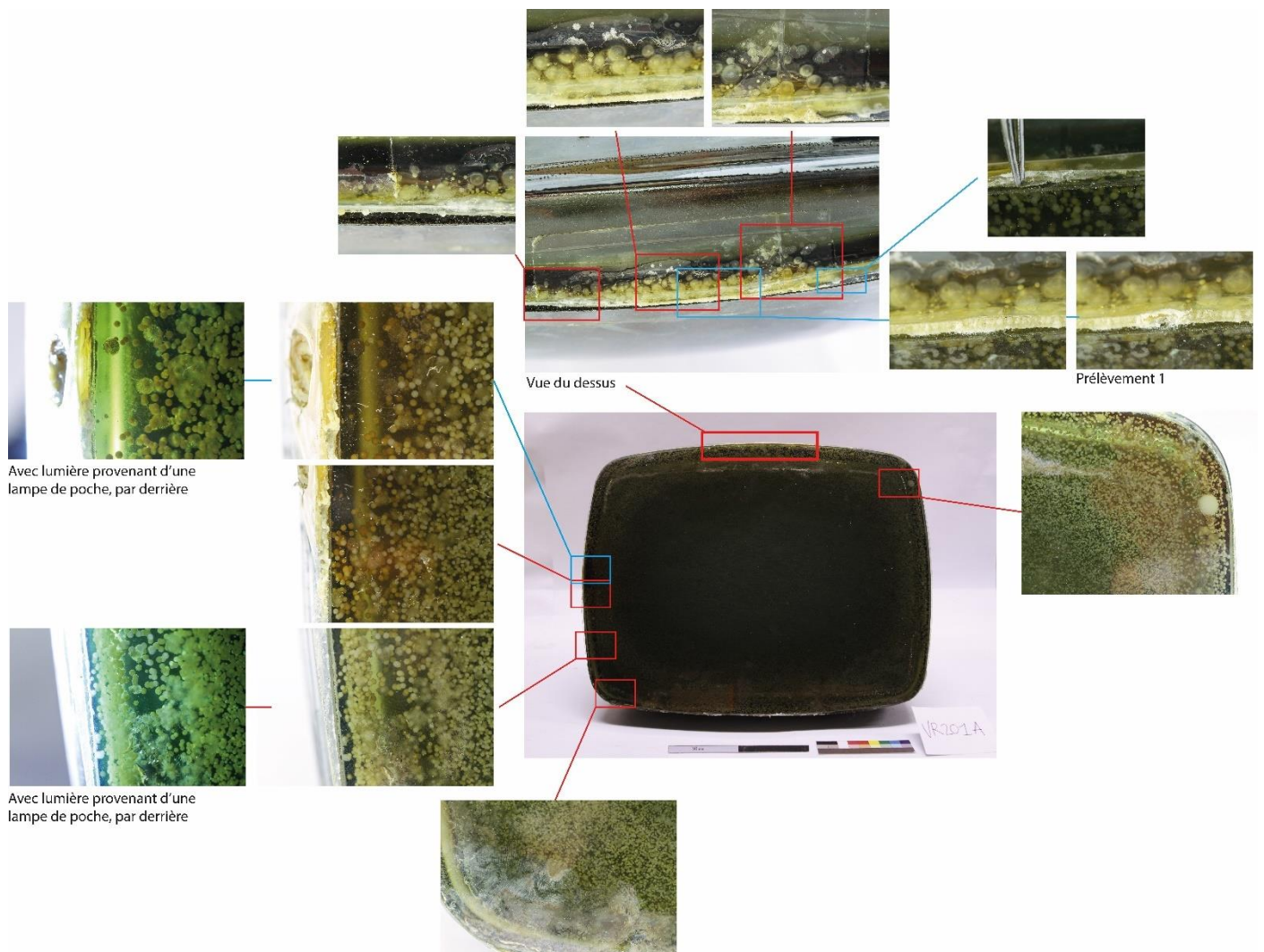


Figure 155 VR201, observation générale de l'altération étudiée © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

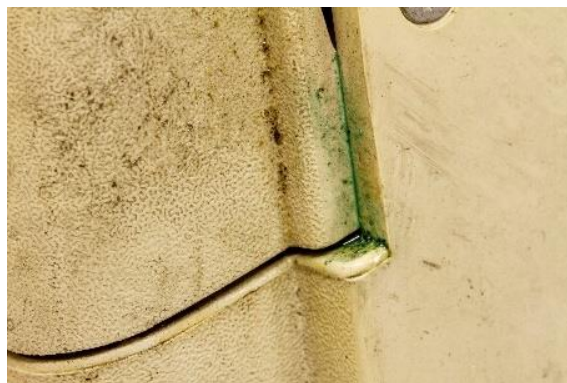


Figure 156 Test d'enlèvement de la première couche de bande adhésive, au niveau de la superposition.
 Ecran VR201 © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

Tableau 15 Autre VR201 très altéré © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

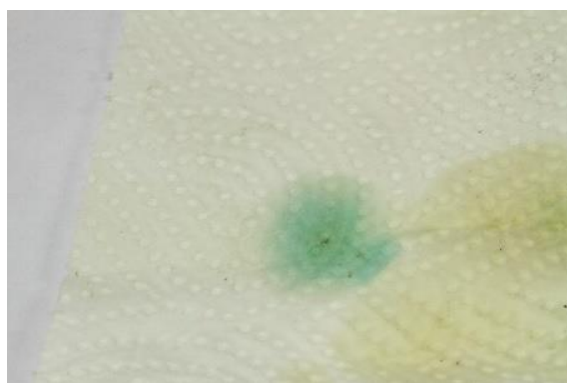
Description	Photographie
Autre VR201 retrouvé dans un des locaux de conservation du musée Bolo. Celui-ci provient d'un garage, il était presque dans un état d'abandon à la vue de toute la poussière et la saleté en surface. On aperçoit comme des coulures dans l'écran. Le milieu de celui-ci est également moins altéré, comme pour le VR201 et VT220 étudiés.	 <i>Figure 157 Autre VR201, de face © HE-Arc, N. Nydegger, 2019</i>
On distingue mieux la saleté qui se trouve un peu partout sur l'objet.	 <i>Figure 158 Autre VR201, de trois quarts © HE-Arc, N. Nydegger, 2019</i>
Lorsque nous l'avons retrouvé, l'étagère sur laquelle il était placé était tâchée d'une substance huileuse, ce qui nous a conduit à l'amener en atelier pour vérifier l'origine de cette coulure. En le retournant nous avons aperçu une substance huileuse et verte provenant probablement d'une corrosion d'un métal fait d'alliage cuivreux.	 <i>Figure 159 Autre VR201, dessous de trois quarts © HE-Arc, N. Nydegger, 2019</i>

Zoom sur le sort de la coulure qui est de couleur verte.



*Figure 160 Autre VR201, coulure verte
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019*

Lorsque nous avons ramené l'objet, nous l'avons posé sur du papier absorbant afin de ne pas mettre la substance inconnue sur les étagères. Celle-ci est en partie jaune et en partie vert turquoise.



*Figure 161 Papier absorbant sur laquelle la substance
a coulé © HE-Arc, N. Nydegger, 2019*

En démontant l'objet nous avons constaté que la coulure s'est déversée dans le boîtier, sur les plaques d'alliage cuivreux. Celle-ci s'est corrodée au niveau des zones atteintes.



*Figure 162 coulure et corrosion sur la plaque de
cuivre inférieure © HE-Arc, N. Nydegger, 2019*

Nous pouvons apercevoir des coulures vert turquoise à plusieurs endroits sous l'écran.



*Figure 163 coulure vert turquoise sous l'écran, arrivant jusqu'au bouton d'anode
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019*

La coulure vert turquoise s'est propagée à l'intérieur du boîtier en plastique.

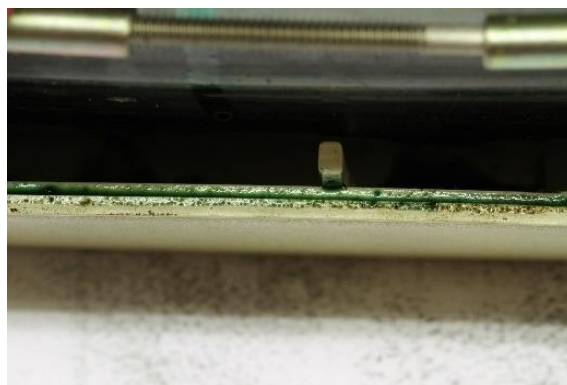


Figure 164 Coulure propagée dans le boîtier, sous l'écran © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

De nombreuses parties métalliques sont corrodées sans avoir eu de contact direct avec la substance, laissant penser que l'atmosphère proche est très corrosive (très acide). Cela pourrait provenir de la dégradation de l'adhésif.



*Figure 165 Cerclage métallique très corrodé
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019*

Les parties métalliques servant à accrocher les composantes de fonctionnement de l'écran sont également corrodées.



Figure 166 Autre partie du cerclage métallique corrodé © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

On aperçoit également des petits points jaunâtres sur quelques parties de l'arrière de l'écran.

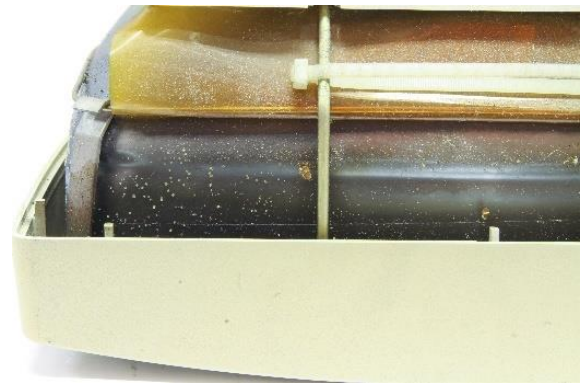


Figure 167 un des coins de l'écran tacheté © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

Zoom sur les taches jaunâtres. Celles-ci ressemblent à l'adhésif dégradé qui se serait effrité en plusieurs morceaux. Ils auraient pu avoir coulé avec la substance huileuse pour se retrouver à cet endroit.

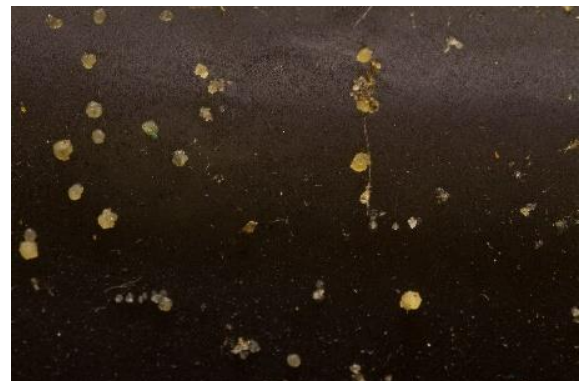


Figure 168 Taches jaunâtres © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

L'intérieur du cadre de l'écran est également altéré et on aperçoit la coulure verte en bas. Le haut est également recouvert d'une sorte de coulure brunâtre.



*Figure 169 Cadre en plastique et métal
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019*

Lorsqu'on observe l'écran altéré, on a l'impression que la substance huileuse a coulé entre l'adhésif et l'écran de protection en verre. L'altération est peut-être un stade plus avancé de celle étudiée.



*Figure 170 Ecran, vue de trois quarts
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019*

Lorsqu'on observe une même partie avec une lumière provenant de l'arrière, on aperçoit des taches similaires à celles documentées sur le VR201 et le VT220 avec des zones plus larges et plus opaques (substance huileuse ?).



*Figure 171 Coin supérieur gauche
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019*

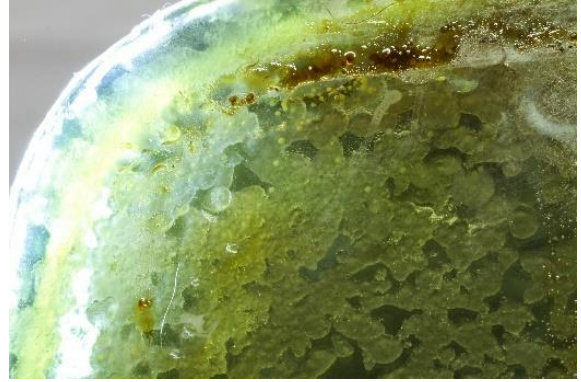


Figure 172 Même coin, avec une lumière provenant de l'arrière © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

On observe comme une coulure dans l'adhésif, sous l'écran de protection en verre.

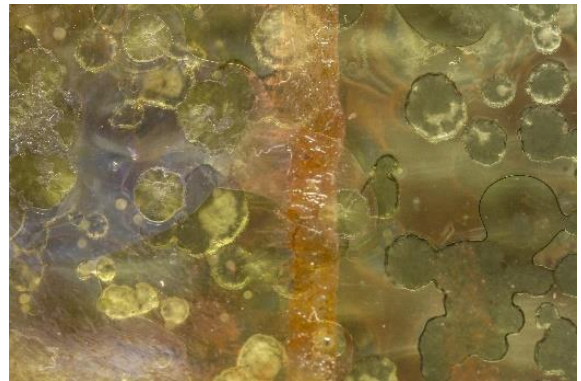


Figure 173 Aperçu détaillé sur une des coulures dans l'adhésif © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

Sur le côté inférieur surtout, on observe des zones opaques.

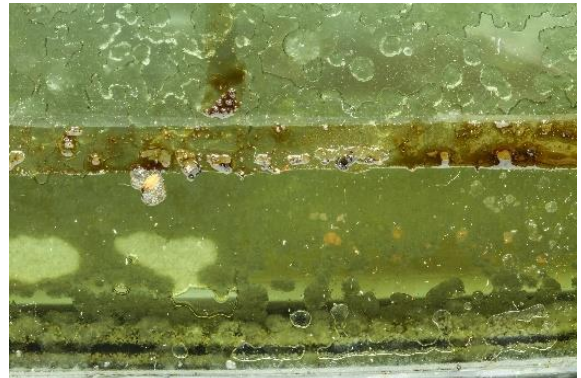


Figure 174 côté inférieur, zones opaques © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

Sur les côtés de l'écran se trouve également une bande adhésive à l'aspect moins dégradé que sur l'écran VR201 étudié. L'altération est également plus prononcée au niveau de la superposition de la bande adhésive.



*Figure 175 Bande adhésive sur les côtés de l'écran
© HE-Arc, N. Nydegger, 2019*

Some common additives:	
Reinforcing fillers	
● wood flour	● carbon fibre
● shredded cloth	● carbon black
● glass, as fibres or spheres	
Non-reinforcing fillers	
● talc	● calcium carbonate
Plasticisers and lubricants	
● phthalate esters	● phosphate esters
● chlorinated paraffins	● epoxidised oils
● organophosphates	● metal stearates
Colours	
● titanium dioxide	● carbon
● powdered metals	● phthalocyanines
● cadmium sulphide	● lead chromate
● zinc oxide	● azos
● ultramarines	● iron oxides
Flame retardants	
● aluminium tri-hydrate	● organo-chlorines
● organo-bromines	● antimony oxide
● phosphates	
Heat and light stabilisers	
● amines and phenol derivatives	● carbon black
● organotin	● lead salts
	● stearates

Figure 176 Additifs communs dans les plastiques ©
 QUYE Anita, WILLIAMSON Colin, 1999, p.28

Stratigraphie, vue du haut

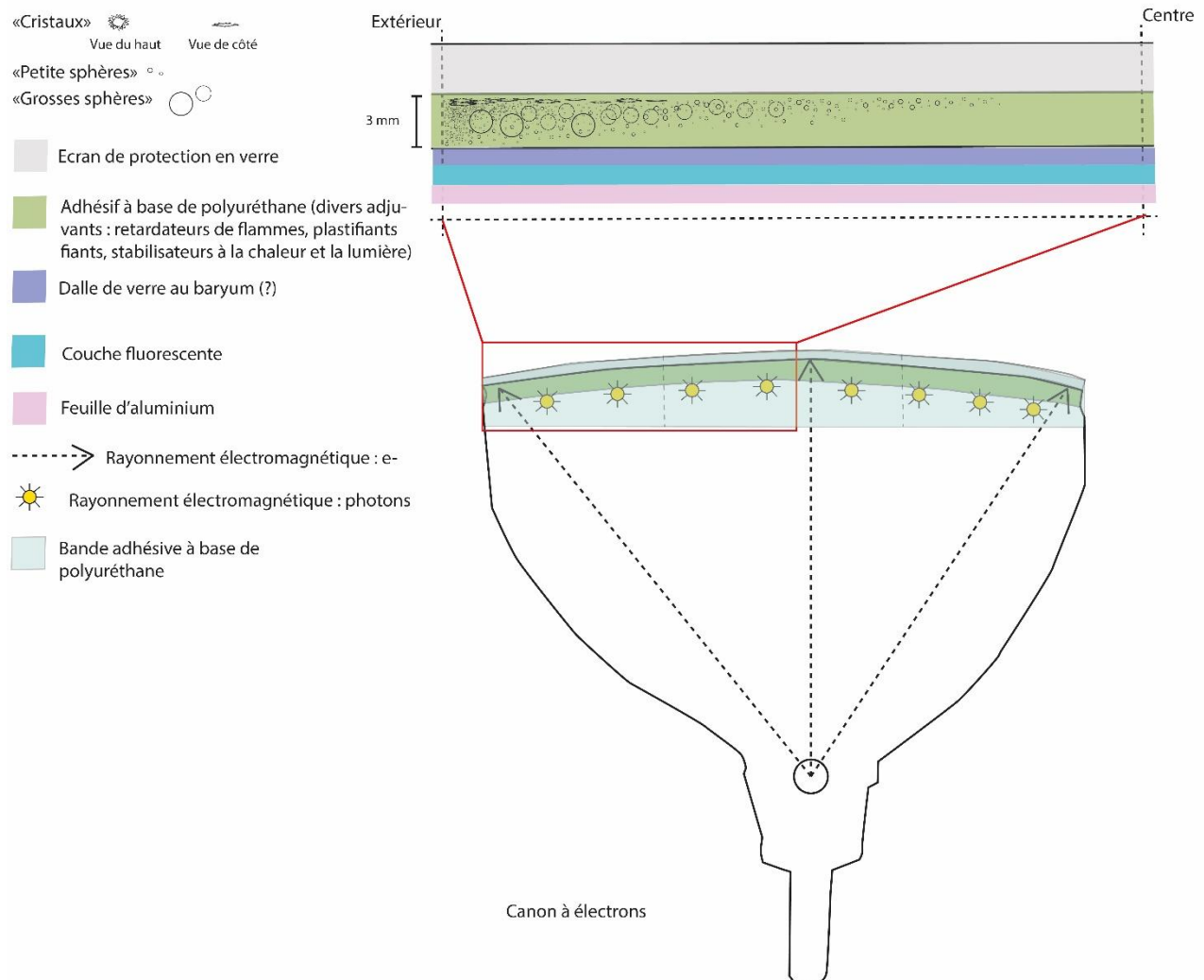


Figure 177 Schéma stratigraphique des écrans cathodiques étudiés © HE-Arc, N. Nydegger, 2019

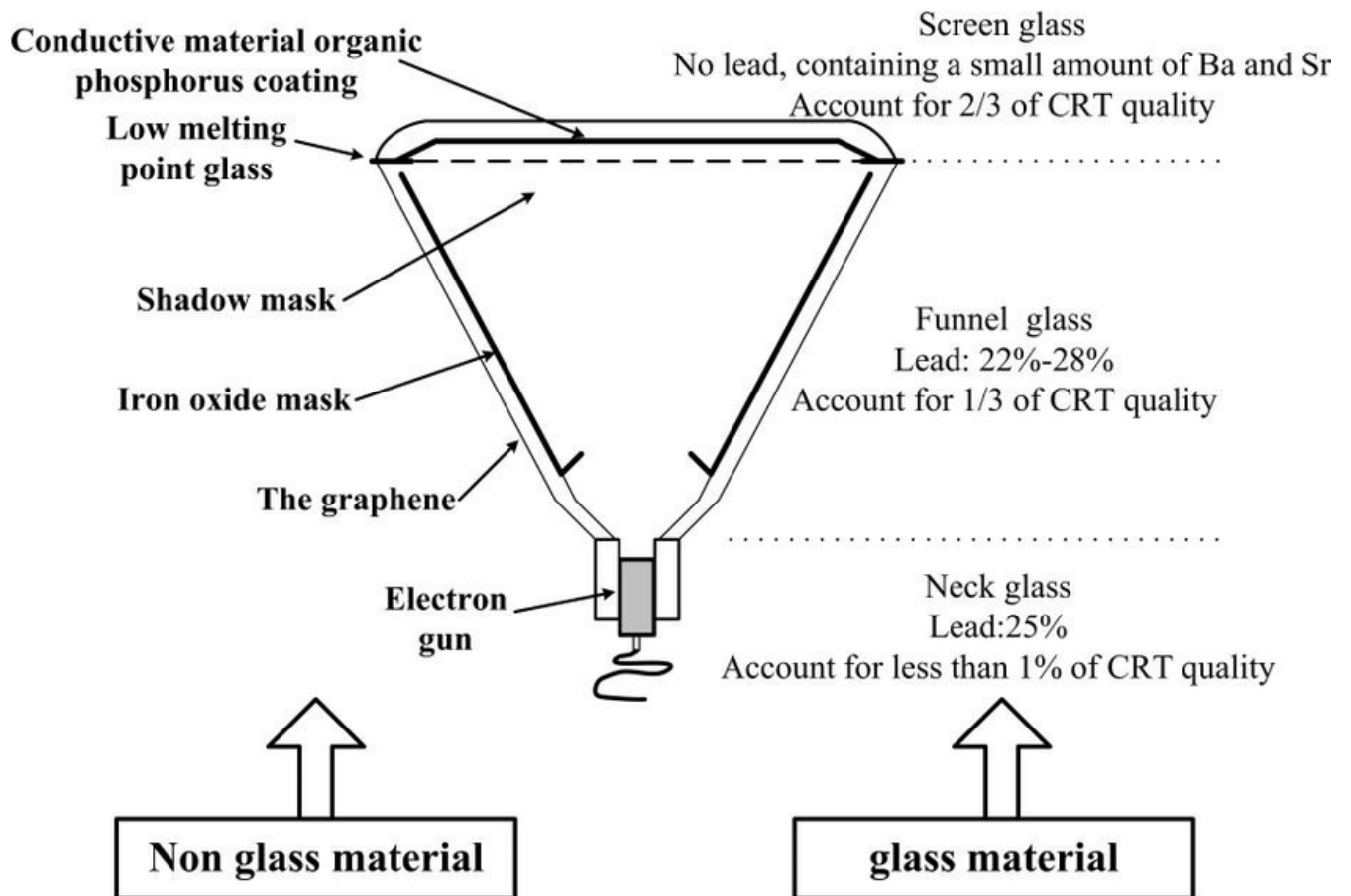


Figure 178 Structure d'un écran cathodique © MENG Wen and Co., 2016

Annexe 7

Synthèse des hypothèses de dégradation

Tableau 16 Hypothèses de dégradation : arguments © HE-Arc, N. Nydegger

Hypothèse	Arguments favorables	Arguments défavorables
Dégradation thermique	La dégradation thermique lors de la fabrication de la résine et son application peut causer des dégradations physiques à partir de 60°C. Il peut y avoir une libération de monomères ou produits de base résiduel comme les phénols, isocyanates et même les amines²⁴² ainsi qu'une libération de produits auxiliaires volatils ou de solvants présents à l'étape de pré transformation du plastique²⁴³. Entre 150 et 400°C²⁴⁴, possible début de décomposition dépendant de la présence d'oxygène pouvant dégager des produits volatils comme des hydrocarbures aromatiques et	Ne participerait pas directement à la dégradation observée pouvant former des sphères cristallines.

²⁴² American Chemistry Council, février 2008 [en ligne]

²⁴³ MAIRESSE M & CO. 1999 [en ligne]

²⁴⁴ INRS, 2017 [en ligne]

	aliphatiques et autres composés oxygénés. Cela induit une dépolymérisation. Les adhésifs de polyuréthane à base d'éther se dégradent par oxydation et jaunissent rapidement s'ils sont exposés à une température de 50°C et plus²⁴⁵, celle-ci pouvant être atteinte lors de l'utilisation des écrans cathodique. Une température inadéquate et surtout élevée accélère la vitesse des dégradations²⁴⁶ de façon générale.	
Photo dégradation	Le jaunissement de l'adhésif peut également être dû à la formation des structures conjuguées elles-mêmes causées par la photodégradation²⁴⁷. La photodégradation modifie de manière irréversible la structure des polymères²⁴⁸.	La photodégradation ne jouerait pas un rôle direct dans la dégradation observée mais y participerait en partie pour l'adhésif et ses adjuvants.
Hydrolyse	Les tests de mesure du pH indiquent qu'il y a une acidité élevée (pH 3-4) dans les échantillons testés ce qui est un indice	L'hydrolyse ne participerait pas directement à la formation de l'altération observée mais pourrait induire des réactions de dégradation dans l'adhésif et ses adjuvants.

²⁴⁵ Selon entretien avec Yvonne Shashoua

²⁴⁶ BERGERON André et NAUD Colette, 16.06.2016 [en ligne]

²⁴⁷ ALLEN N.S. EDGE M. and HORIE C.V., 1992, p.27

²⁴⁸ RAMEL Sylvie, 15.09.2007 [en linge]

	suggérant que des réactions d'hydrolyse peuvent être en jeu dans l'altération de la matière. L'adhésif étudié sur les écrans cathodique n'a pas l'air d'être étanche à l'humidité. Si l'humidité de l'air arrive à s'infiltrer jusqu'à l'adhésif et pénétrer plus en profondeur, cela expliquerait pourquoi les zones externes sont plus altérées que le centre de l'écran. Une humidité relative élevée favoriserait l'action dégradante des polluants atmosphériques acides, comme le dioxyde de soufre et le dioxyde d'azote, ainsi que d'autres sous-produits acides provenant de la dégradation²⁴⁹.	D'après la littérature, Le polyuréthane n'est pas très sensible aux dégradations induites par l'hydrolyse²⁵⁰. Les différentes recherches, tests effectués et spécialistes contactés semblent pourtant montrer le contraire.
Polluants atmosphériques	L'oxygène de l'air peut avoir un rôle dans plusieurs processus de dégradation ainsi que participer au jaunissement du polyuréthane. Une oxydation se fera encore plus facilement en présence d'ozone car c'est un oxydant puissant²⁵¹.	Le polyuréthane n'est pas très sensible aux dégradations induites par l'oxygène et l'ozone²⁵². Les polluants atmosphériques peuvent participer à la dégradation de l'adhésif de polyuréthane mais ne formeraient à priori pas des sphères rigides dans la matière elle-même.

²⁴⁹ ICC, 03.05.2019 [en ligne]

²⁵⁰ ALLEN N.S. EDGE M. and HORIE C.V., 1992, p.31

²⁵¹ TETRAULT Jean. 18.05.2018 [en ligne]

²⁵² ALLEN N.S. EDGE M. and HORIE C.V., 1992, p.31

	Le polyuréthane est sensible aux attaques de dioxyde d'azote.	
Micro-organismes	Visuellement, l'altération fait penser à une infestation de micro-organismes à plusieurs professionnels en mycologie et conservation-restauration.	Les tests de bioluminescence, FTIR et les essais de mise en culture ont fourni des résultats négatifs quant à la présence de micro-organismes.
Migration de retardateurs de flamme	Test de Beilstein positif pour la présence de composés halogénés.	D'après les tests FTIR, les sphères ne seraient pas composées de retardateurs de flamme qui aurait migré.
Migration de plastifiants	L'aspect huileux survenu pendant les semaines de travail en atelier atteste d'une dégradation active, peut-être à cause des plastifiants. L'acide adipique qui a peut-être été utilisé comme plastifiant ou produite de fabrication est de base sous forme solide, cristalline et blanche. L'acide adipique pourrait être un produit de dégradation de l'adhésif et/ou un plastifiant qui aurait laissé des restes solides et provoquer un suintement.	D'après les tests FTIR, les sphères pourraient être un plastifiant qui aurait migré. Il serait nécessaire de faire des tests complémentaires sur l'exsudat observé afin de vérifier cette hypothèse.

Migration d'antioxydants	L'hypothèse d'une efflorescence provenant des antioxydants est probable : ceux-ci peuvent rencontrer des défauts de dispersion lorsqu'ils sont mélangés à un plastique. S'ils ne sont pas fondus assez bien à cause de leur haute température de fusion, les antioxydants peuvent rester sous forme de larges morceaux et ne se dispersent pas correctement dans le mélange²⁵³. Tout type d'additif de type antioxydant est susceptible de former des exsudations et migrations en surface d'un plastique s'il est mal dispersé dans la matière²⁵⁴.	Trop peu d'informations et d'éléments favorables à cette hypothèse.
Migration de charges	Test de Beilstein positif pour la présence de composés halogénés. Il existe des charges à base de NaCl notamment.	Trop peu d'informations et d'éléments favorables à cette hypothèse.

²⁵³ MYER Ezrin, 1996, p.27

²⁵⁴ Ibidem., p.28