

יחסי הגומלין בסביבה ימית והשפעתם על אלמוגים

Yvan Bettarel^{1*}, Elyse Boudin¹, Sébastien Halary², Jean-Christophe Auguet¹, Jean Péronnin³,
Thierry Bouvier¹, Emma Rochelle-Newall⁴, Van Ngoc Bui⁵, Christelle Desnues⁶

¹UMR MARBEC IRD-CNRS-IFREMER – אוניברסיטת מונפלייה, מונפלייה, צרפת

²UMR MCAM², המוזיאון הלאומי להיסטוריה של הטבע, CNRS, פריז, צרפת

³בית הספר המקצועי הנרי סיינט קלייר דוויל, איסויר, צרפת

⁴המכון למדעי האקולוגיה והסביבה בפריז (EES-Paris), אוניברסיטת סורבון, אוניברסיטת CNRS, INRA, פריז, צרפת

⁵מכון הביוטכנולוגיה של האנו (IBT), אקדמיית וייטנאם למדע ולטכנולוגיה (VAST), האנו, וייטנאם

⁶MIO⁶, אוניברסיטת איקס-מרסיי, אוניברסיטת טולון, CNRS, IRD, מרסיי, צרפת

סוקרים צעירים

ADITRI

גיל: 12



ANSHUL

גיל: 9



LUVENA

גיל: 11



PRANATEE

גיל: 12



סמוך לחוף של וייטנאם, שני אירועים ככל הנראה תרמו למותן של שוניות אלמוגים לאחרונה: פלישה מהירה של חילזון ימי קטן שנקרא *Drupella*, והופעתה של מחלה המתפשטת על גבי אלמוגים. החלטנו לחקור אם ישנו קשר בין האלמוגים, החלזונות והמחלה. לשם כך ניתחנו את הריר שמכסה את פני השטח של האלמוגים, באלמוגים בריאים ובאלה ששרצו בהם חלזונות *Drupella*. ריר שנוצר על ידי אלמוגים בדרך כלל מלא במיקרובים מועילים, ומגן על אלמוגים מפני מיקרובים מזיקים שעלולים לגרום להם לחלות, או להרוג אותם. הניתוח שלנו הראה שכאשר *Drupella* אוכלים אלמוגים, החלזונות גם מסירים את אחת ההגנות הראשוניות של האלמוגים באמצעות חיסול מרבית המגינים הזעירים שנמצאים בריר שלהם. הדבר מאפשר למיקרובים מזיקים לגרום נזק נוסף לאלמוגים.

אין מנוס לאלמוגים

כדי להגן על עצמן מפני תוקפים, חיות כמו צבאים, ארנבות, או עכברים יכולות לברוח. מאחר שהן ניידות – בעלות יכולת תנועה, חיות אלה יכולות לרוץ. אולם חיות אחרות אינן מסוגלות לזוז, או שהן יכולות לזוז לאט בלבד, על פני מרחקים קטנים. זהו המקרה של אלמוגים. אלמוגים הם חיות זעירות שחיות יחד על מבני סלעים שהן בונות. מבני הסלעים יוצרים שוניות אלמוגים שידועות ביופיין ובכך שהן מספקות מחסה לאלפי מינים ימיים לרבות דגים, ספוגיים, סרטנאים ותולעים. למרבה הצער, שוניות אלמוגים ידועות גם בשבריריותן ובאיומים שמסכנים אותן, בהם בין השאר: מים חמים, טורפים, סופות הוריקן, זיהום וכן נזק מידי אדם ומסנפירי צלילה. נוסף על חוסר יכולתם לברוח מאיומים, אלמוגים גדלים לאט מאוד – רק מספר מילימטרים בשנה. כיום, שלישי ממניי האלמוגים נמצאים בסכנה ועלולים להיכחד בעתיד הקרוב.

מתקפת החלזונות

חלק ממיני הדגים וכוכבי הים מפורסמים בכך שהם ניזונים מאלמוגים, אולם לאחרונה חילזון ימי קטן שנקרא *Drupella*, מין מקומי באוקיינוסים ההודי והשקט, התגלה גם כטורף אלמוגים פעיל. באזורים מסוימים בעולם, התוקפים האיטיים האלה גדלים במספרם, ולעיתים מתקפותיהם הורגות את האלמוגים.

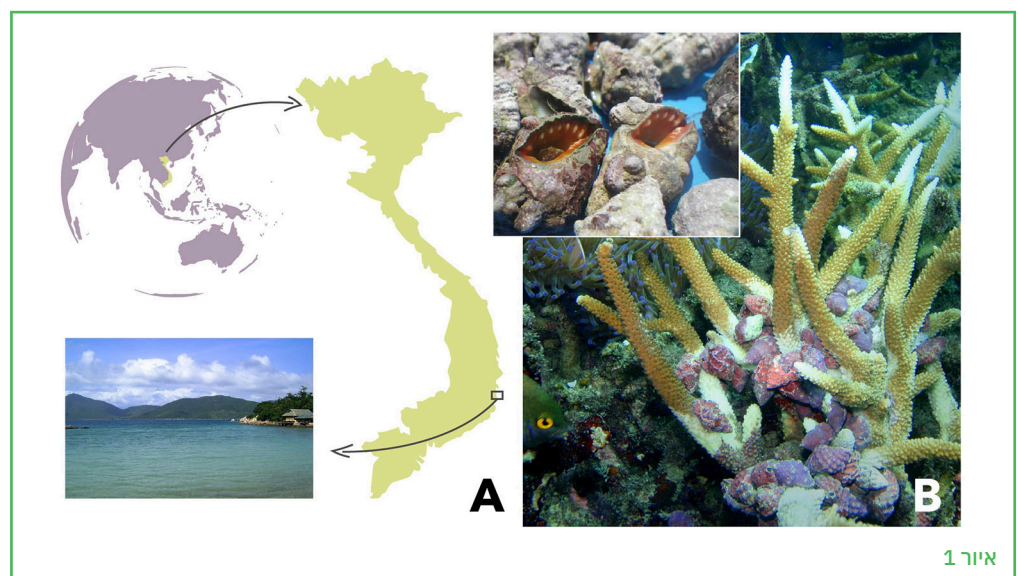
קבוצת המחקר שלנו ביצעה את מחקרה בחוף נה טראנג בווייטנאם. שם, האלמוגים סובלים מאוכלוסייה גדלה של *Drupella*. במספרים קטנים, החילזון הזה אינו גורם נזק רב, אולם בשנים האחרונות שכיחות החילזון גדלה מאוד. לאלמוגים שהחילזון התיישב בהם יש שני מאפיינים מעניינים. ראשית, האלמוגים נשארים לבנים לגמרי וחסרי חיים לאחר שהחלזונות תוקפים אותם. שנית, עקבות של מחלת אלמוגים נראות גם על חלקים של האלמוגים שהחלזונות עדיין לא נגעו בהם (איור 1). מטרת מחקרנו הייתה ללמוד עוד על הקשרים שבין החלזונות לבין המחלות שהרסו את האלמוגים בנה טראנג. רצינו לבחון אם *Drupella*

מחלת אלמוגים (Coral disease)

מספר מחלות יכולות להשפיע על אלמוגים ולגרום להלבנה של פני השטח שלהם או להיווצרות פסים בגווני לבן, שחור, או חום על האלמוגים. מחלות אלמוגים נגרמות לרוב על ידי חיידקים, וירוסים, או פטריות קטנות, ולעיתים הן עלולות להוביל למותם של אלמוגים.

איור 1

ההשפעה של *Drupella* על אלמוגים. (A) מפרץ נה טראנג בווייטנאם, שם בוצע המחקר שלנו. (B) *Drupella* אוכלים אלמוגים: אזורים מסוימים באלמוגים כבר לבנים, היכן שפני השטח אוכלים. התקריב מראה פרטים שונים של *Drupella*, שקשורים לאלמוגים מסוג *rugosa* © (CC BY-SA 4.0). (ConserveMarine).



איור 1

מיקרוב (Microbe)

אורגניזם קטן כל כך שלא ניתן לראותו בעין בלתי מזוינת. מיקרובים, אשר כוללים חיידקים ווירוסים, הם האורגניזמים השכיחים ביותר על כדור הארץ; נמצאים בכל מקום – באוויר, במים, ומקושרים לכל האורגניזמים החיים.

מערכת חיסון (Immune system)

מערכת הגוף שמזהה מיקרובים לא ידידותיים ומגינה על אורגניזמים מפניהם.

ריר (Mucus)

שכבה סמיכה שמיוצרת בפני השטח של עורן של מרבית החיות הימיות. היא מכילה כמות גדולה של מיקרובים שימושיים שמעורבים בהגנה על חיות מפני מיקרובים פולשים מהסביבה.

וירוסים (Viruses)

המיקרואורגניזמים הקטנים ביותר בכדור הארץ (קטנים פי עשרה מחיידקים). וירוסים אינם יכולים להתרבות בעצמם, לכן הם צריכים למצוא מארח (שיכול להיות חיידק, צמח, חיה, או בן אדם), להיכנס לתוכו, להתרבות, ובדרך כלל בסוף התהליך יוצאים מהמארח. כמו חיידקים, הם לא תמיד מזיקים וגורמים למחלות. להפך, מרביתם מגינים על המארח שלהם מפני חיידקים מסוכנים!

מכונה לריצוף דנ"א (DNA sequencing)

מכשיר עוצמתי שמאפשר לפענח את המידע הגנטי (דנ"א) שמכיל כל תא.

גרמו למחלה, או אם האלמוגים כבר היו חולים לפני הגעת החלזונות. אם כן, החלטנו לצלול לעומק במטרה להתבונן מקרוב יותר על האלמוגים.

ריר אלמוגים – שכבת הגנה שופעת מיקרובים מועילים

הצעד הראשון שלנו היה להבין את מקור מחלת האלמוגים. מאחר שאלמוגים אינם מסוגלים לזוז, הם פגיעים במיוחד למתקפות של טורפים. אולם, יש להם הגנות כנגד פולשים מיקרובים, ולא כל המיקרובים מסוכנים לאלמוגים. נהפוך הוא, חלק מהמיקרובים מסייעים לאלמוגים להישאר בריאים, ונחשבים כרכיבים במערכת החיסון של אלמוגים! הקרב בין מיקרובים מועילים ומזיקים מתרחש בשכבת הריר של אלמוגים. ריר הוא חומר עבה ודביק שמכסה לחלוטין את האלמוגים, ומיוצר על ידי האלמוגים עצמם. שכבת הריר הזו מכילה הרבה מיקרובים מועילים שפועלים כמו חיילים, ומחסלים את כל המיקרובים המזיקים האחרים שפולשים ומנסים לגרום לאלמוגים לחלות. במחקר שלנו, ביקשנו להבין כיצד החיילים הזעירים האלה יגיבו במהלך מתקפת חלזונות. אם כן, אספנו את הריר מחלקים שונים של האלמוגים, עם וללא Drupella, כדי להשוות ביניהם.

בחינת מיקרובים בריר האלמוגים

חיידקים ווירוסים הם קטנים להפליא. כדי שתקבלו קנה מידה של גודל – חיידקים קטנים פי 100 מעובייה של שערה אחת, ווירוסים קטנים פי 10 מחיידקים! לכן, לא ניתן לראות אורגניזמים קטנים שכאלה בעין בלתי מזוינת. כדי לזהותם ולאחרם, אנו משתמשים במכונה לריצוף דנ"א. דנ"א נמצא בכל התאים באורגניזמים חיים. הוא מכיל קוד גנטי של אורגניזם, וקובע את כל המאפיינים של אותו האורגניזם. דמיינו הוראות הפעלה עם 4 אותיות בלבד! ההבדל בין הוראות הפעלה של בני אדם לאלה של דג זהב טמון רק בסדר של חלק מהאותיות האלה. לכל אחד מהמינים הוראות הפעלה ייחודיות, שהן הדנ"א של אותו מין. במחקרנו הפקנו את מרב הדנ"א האפשרי מריר של אלמוגים, במטרה לזהות את כל המיקרובים שחיים בו. לאחר מכן, חיפשנו במאגר נתונים שבו נמצאים כל קודי הדנ"א המוכרים של מינים חיים (איור 2), כדי לאתר את הזהויות של המינים שגילינו בריר האלמוגים.

חלזונות פוגעים בריר אלמוגים

מצאנו כי ריר האלמוגים שהיה מאוכלס על ידי Drupella היה שונה מריר של אלמוגים בריאים. החיידקים והוירוסים שנמצאו בריר האלמוגים שאוכלס בחלזונות היו רבים יותר ושונים מאלה שנמצאו באלמוגים בריאים שהחלזונות חסו עליהם. למרבה הצער, רבים מהמיקרובים המועילים הוחלפו על ידי מיקרובים מזיקים שמחוללים מחלות אלמוגים (איור 3).

מדוע המיקרובים המסוכנים גדלו על האלמוגים שהותקפו על ידי חלזונות? האם החלזונות אחראים לכך? אנו מאמינים שבזמן אכילת האלמוגים החלזונות פגעו באופן חמור בשכבת הריר של האלמוגים, ובמיקרובים המועילים שחיים בה. בזמן שהמיקרובים המועילים כבר

איור 2

זיהוי מיקרובים שחיים בריר אלמוגים. (1) ריר נלקח מאלמוגים בריאים שנאכלים על ידי חלזונות. (2) הריר מסונן לצורך איסוף כל המיקרובים. (3) דנ"א מזוקק מהמיקרובים. (4) הדנ"א המיקרובי ממוקם בקופסאות קטנות. (5) מכונת ריצוף קוראת וקובעת את רצפי הדנ"א בדגימות. (6) מחשב מנתח את הנתונים, ומשווה אותם לנתונים של רצפי דנ"א של כל המיקרובים המוכרים. (7) התוצאות מלמדות אותנו אילו מיקרובים, מועילים ומזיקים כאחד, נמצאים בריר. (©Elyse Boudin)



איור 2

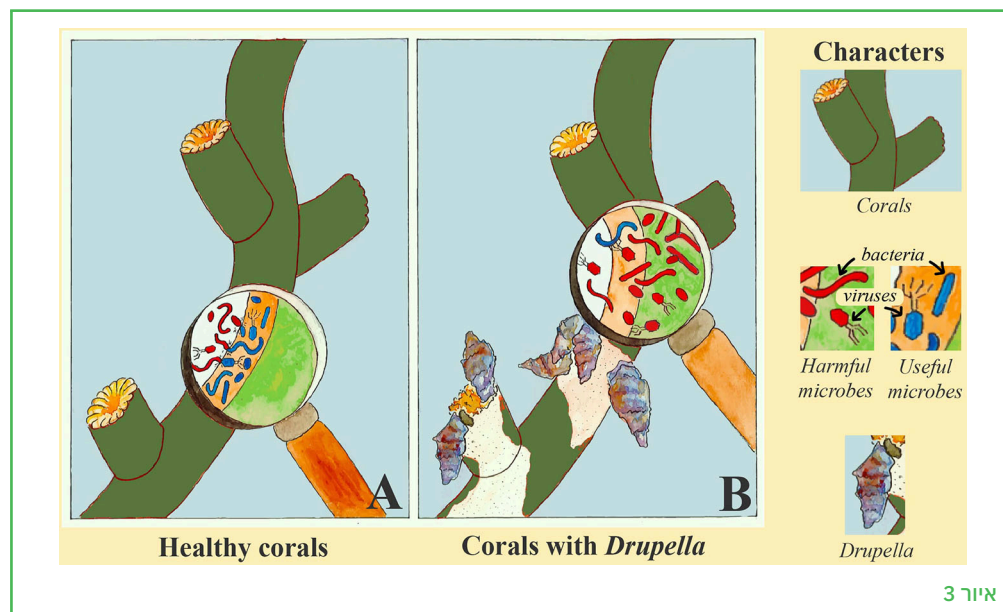
לא מסוגלים להגן על אלמוגים כנגד מיקרובים מזיקים, האלמוגים הופכים כפופים לשליטתם של המיקרובים המזיקים, ועלולים לחלות.

סיכום ומסקנות

"החילוץ הרעב" Drupella נמצא באופן טבעי בימים של דרום-מזרח אסיה, ואוכלוסייתו גדלה מאוד בשנים האחרונות. עלייה זו נובעת ככל הנראה מדיג עודף, מאחר שהזחלים של חלזונות Drupella בדרך כלל נאכלים על ידי דגים. דיג עודף מפחית את מספר הדגים, והמשמעות היא שיותר זחלי Drupella שורדים והופכים בוגרים. ל-Drupella בוגרים יש שריונות קשים והם לגמרי לא אכילים, לכן הם יכולים לגדול ולהתרבות בבטחה. אם כן, ניתן

איור 3

השוואה בין אלמוגים עם וללא *Drupella*. (A) הזכוכית המגדלת מראה לנו שאלמוגים בריאים מארחים (Healthy corals) מיקרובים מועילים (בכחול) בריר שלהם, אשר מגן על האלמוגים מפני מיקרובים מזיקים (באדום). (B) כאשר שכבת הריר ניזוקה על ידי *Drupella*, גדלים מיקרובים מזיקים רבים יותר, מה שגורם להתפתחות של מחלות אלמוגים.
(©Jean Péronnin)



לראות בבירור כי לדיג עודף יש השלכות על בריאות אלמוגים! מצאנו כי לא רק שהחלזונות מקלפים את פני השטח של האלמוגים ופוגעים בהם, מתקפות החלזונות גורמות לאלמוגים השבריריים להיות פגיעים אפילו יותר, בכך שהן מספקות נתיב לפלישה של חיידקים ווירוסים מזיקים.

לבסוף, המחקר המקורי שלנו [1] מצביע על חשיבותם של ריר האלמוגים ושל חיידקים מועילים שחיים בו, המהווים חלק מהמערכת החיסונית של האלמוגים. אורגניזמים מיקרוסקופיים נחקרים על ידי עוד ועוד קבוצות, מאחר שהם נמצאים בכל איבר ומערכת בקרב חיות ימיות: במעיים שלהן, על עורן, ואפילו בתוך מוחותיהן! למיקרובים המועילים האלה יש השלכות חיוביות רבות על המארחים שלהם. זה נכון גם עבור בני אדם – המיקרובים שחיים על גופנו ובתוכו, ממלאים תפקיד חשוב בבריאותנו, בתהליך עיכול המזון שלנו, ואפילו בהתנהגותנו. נדמה שהמיקרובים האלה פועלים כקבוצה מאורגנת להפליא. אולם, מיקרובים מועילים הם כל כך שכיחים ומגוונים שאיננו יודעים עדיין מה כולם עושים. עלינו להמשיך לחקור את התפקידים של מיקרובים מועילים בכל המינים, מאחר שהם יכולים לחשוף סודות כמוסים אחרים שעשויים לסייע לנו להגן על בריאותם של כל האורגניזמים – מאלמוגים שבריריים ועד לבני אדם.

מאמר המקור

Bettarel, Y., Halary, S., Auguet, J. C., Mai, C. T., Bui, V. N., Bouvier, T., et al. 2018. Corallivory and the microbial debacle in two branching scleratinians. *ISME J.* 12:1109–26. doi: 10.1038/s41396-017-0033-5

מקורות

1. Bettarel, Y., Halary, S., Auguet, J. C., Mai, C. T., Bui, V. N., Bouvier, T., et al. 2018. Corallivory and the microbial debacle in two branching scleratinians. *ISME J.* 12:1109–26. doi: 10.1038/s41396-017-0033-5

פורסם אונליין: 23 במאי 2023

נערך על ידי: Nathan M. Good

מנחה מדעית: Jessica Audrey Lee

ציטוט: Bettarel Y, Boudin E, Halary S, Auguet J, Péronnin J, Bouvier T, Rochelle-Newall E, Bui VN and Desnues C (2023) יחסי הגומלין בסביבה ימית והשפעתם על אלמוגים. *Front. Young Minds.* doi: 10.3389/frym.2021.573856-he

תורגם והותאם מ: Bettarel Y, Boudin E, Halary S, Auguet J, Péronnin J, Bouvier T, Rochelle-Newall E, Bui VN and Desnues C (2021) The Hungry Snail, the Fragile Coral, and the Friendly Microbe. *Front. Young Minds* 9:573856. doi: 10.3389/frym.2021.573856

הצהרת ניגוד אינטרסים: המחברים מצהירים כי המחקר נערך בהעדר כל קשר מסחרי או פיננסי שיכול להתפרש כניגוד אינטרסים פוטנציאלי.

Bettarel, Boudin, Halary, Auguet, Péronnin, Bouvier, 2023 © 2021 © COPYRIGHT Rochelle-Newall, Bui and Desnues. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון [Creative Commons Attribution License \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). השימוש, ההפצה או ההעתקה מותרים לשימוש בפורומים אחרים ובלבד שיינתן קרדיט למחבר(ים) המקוריים ולבעל זכויות היוצרים, ושהפרסום המקורי בעיתון זה מצוטט בהתאם למקובל באקדמיה. השימוש, ההפצה או ההעתקה אינם מותרים אם הם אינם עומדים בתנאים אלה.

סוקרים צעירים

ADITRI, גיל: 12

קוראים לי אָדִיטְרִי, ואני בכיתה ו. חלק מהדברים שאני אוהבת לעשות הם קריאה ואומנות, שהיא ככל הנראה מה שאני הכי אוהבת לעסוק בו בזמני הפנוי. ב-4-5 השנים האחרונות אני גם מנגנת בפסנתר. כשאגדל, ארצה להיות אסטרופיזיקאית!

ANSHUL, גיל: 9

היי! קוראים לי אַנְשׁוּל ואני לומד בכיתה ד בצפון וילס, פנסילבניה, קרוב לפילדלפיה. אני מתעניין מאוד בביולוגיה ובאנטומולוגיה (חֶקֶר החרקים). אני חבר פעיל בתוכנית John Hopkins CTY, והתחביב האהוב עליי הוא קריאה.





LUVENA, גיל: 11

היי, קוראים לי לובנה! אני אוהבת ספורט, מוזיקה ומזון. המקצועות האהובים עליי בבית הספר הם מתמטיקה ושפה. בזמני הפנוי, אני נהנית לנגן בפסנתר ולקרוא ספרים עם אחותי. כשאגדל, ארצה להיות מנתחת מוח.

PRANATEE, גיל: 12

הלו! אני אוהבת לאפות, במיוחד עוגות טארט ופאי. בבית הספר, התחומים האהובים עליי הם מדע, ארוחת צהריים וההפסקה. אני אוהבת לבלות זמן בחוץ ולצאת לטיולים. אני גם אוהבת ללכת לחוף הים, ומגלה עניין בצילום. הדברים שאני הכי אוהבת לעשות בזמני הפנוי הם צפייה בסדרות הטלוויזיה האהובות עליי; ציור; האזנה למוזיקה; שירה וביילוי עם חברים. בעתיד, ארצה להיות מדענית, או זמרת/כותבת שירים ושחקנית.

הכותבים

YVAN BETTAREL

יבן בֶּטָרֵל הוא מיקרוביולוג ימי במכון המחקר הצרפתי הלאומי לפיתוח בר-קיימא (IRD). הוא חי ועבד בייטנאם ובסֶנְגָל במטרה לחקור את תפקידם של וירוסים טרופיים וחיידקים טרופיים בבריאות האוקיינוס. *yvan.bettarel@ird.fr

ELYSE BOUDIN

אליס בודין סיימה את לימודיה לתואר בהנדסה אקולוגית באוניברסיטת מונפלייה בשנת 2019. כיום, היא מעורבת בכמה פרויקטים סביבתיים וחינוכיים בדרום צרפת. פרויקטים אלה מערבים מחקר של אקולוגיה ימית ויבשתית, צילום ויצירת כלים של חינוך סביבתי.

SÉBASTIEN HALARY

סבסטיאן הָלָרִי הוא מיקרוביולוג במוזיאון הלאומי להיסטוריית הטבע בפריז. הוא חוקר חיידקים ווירוסים על ידי פענוח הדניא שלהם, במטרה להבין כיצד כל המיקרובים האלה חיים יחד בסביבה שלהם.

JEAN-CHRISTOPHE AUGUET

ג'ין כריסטוף אָוגוֹאֵט, חוקר CNRS, הוא אקולוג מיקרובים נלהב. המחקר הנוכחי שלו מתמקד במיקרובים שקשורים בחיות המאכלסות שוניות. הוא מתעניין במיוחד בחיידקים פתוגנים פוטנציאליים, שאותם הוא חוקר באמצעות כלים מולקולריים ושיטות ריצוף גנטי מתקדמות.

JEAN PÉRONNIN

ג'ין פֶרוֹנִין הוא פרופסור להנדסת חשמל בבית הספר המקצועי באיסויר (צרפת). הוא מתעניין במיוחד בבריאות של נהרות מקומיים ובאכלוסיות דגי הפורל שלהם. באופן כללי, יש לו תשוקה לטבע, שהוא מקור גדול להשראה עבור האיורים והציורים שלו.

**THIERRY BOUVIER**

ט'ירי בון'יר הוא אקולוג מיקרובים ימי במעבדת MARBEC שממוקמת במונפלייה, צרפת. הוא התחיל לחקור חיידקים בנט'יים (שקשורים לקרקעית הים) ופ'גיים (שקשורים לים הפתוח), וכן ירוסים מאוקיינוסים בקוטב, אוקיינוסים משוונים ואוקיינוסים טרופיים. כרגע, מחקרו מוקדש כולו למיקרוביומים שמקושרים עם חיות ימיות, במטרה להבין מיהם, מה תפקידם ומה עתידם.

**EMMA ROCHELLE-NEWALL**

אמה רוק'ל ניואל היא אקולוגית מיקרובים ימיים במכון המחקר הצרפתי הלאומי לפיתוח בר-קיימא (IRD). היא חוקרת כיצד השלכות אנתרופוגניות (התערבות האדם בטבע) משפיעות על מגוון מיקרובי ועל הפעילות במערכות אקולוגיות מתונות וטרופיות. היא גם בודקת כיצד פתוגנים מתפזרים במערכות אקולוגיות ימיות ומתרבים בהן, במיוחד במדינות מתפתחות.

**VAN NGOC BUI**

אן נגוק בוי הוא ביולוג רוקחות במכון לביוטכנולוגיה של האנוי, וייטנאם. המחקר הנוכחי שלו מתמקד במטנגומיקה (חקר החומר הגנטי מדימויות סביבתיות) ובמגוון של חברות מיקרוביות שקשורות לאלמוגים.

**CHRISTELLE DESNUES**

לקריסטל ד'סנואס, מנהלת מחקר ב-CNRS, יש תשוקה לווירוסים, לאקולוגיה שלהם ולבריאות בני אדם. היא חוקרת מגוון ירוסים, לרבות הדינמיקה שלהם והתפתחותם בממשקי מערכות אקולוגיות של בני אדם וחיות. באמצעות ניסיון המחקר הכפול שלה במדעי הרפואה ובמדעי הסביבה, היא מייצרת באופן פעיל גשר בין רופאים ואקולוגים, שעולה בקנה אחד עם גישת "בריאות אחת – תרופה אחת". זאת במטרה להבין טוב יותר את האינטראקציות בין הסביבה, חיות ובריאות אנושית.

מוזיאון המדע ע"ש בלומפילד ירושלים
متحف العلوم على اسم بلومفيلد القدس
Bloomfield Science Museum Jerusalem



הוצאת פרונטירז מדע לצעירים ישראל
Hebrew version provided by



THE SAGOL NETWORK